
長野県南信工科短期大学校

紀 要

第 8 号

2024



長野県南信工科短期大学校

NAGANO PREFECTURE NANSHIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

長野県南信工科短期大学校紀要

第8号 2024

目次

巻頭言

紀要第8号の発刊	武田三男	1
----------	------	---

論文・解説

ハイブリッドロケット地上支援設備の開発	松原洋一	2
あらゆるバレル工具に対応した5軸制御加工のための工具経路生成	岡本 謙, 森重功一	8
テラヘルツ時間領域分光法による複素誘電関数の決定と電磁波分散関係の導出(その1)	武田三男, 北原英明	14

技術資料

大芝湖における多重衝突形水車によるマイクロ水力発電実験	栗田秀實, 倉澤 勝美, 宮島 俊, 武田三男	27
-----------------------------	-------------------------	----

事例紹介

学術雑誌 Small への研究論文掲載について		
ールビー単結晶の大幅な育成低温化に関する研究ー	鮎沢俊輔	38
職業能力開発短期大学校と大学への編入学	武田三男	40
南箕輪小学校6年1組とコラボしたイルミネーションの製作	柳沢裕二	50
伊那弥生ヶ丘高校の「総合的な探究の時間」		
ーコミュニケーションデザインを学ぶー	鮎沢俊輔	54

研究・教育・社会活動の概要		55
---------------	--	----

編集後記		65
------	--	----

**JOURNAL OF
THE NAGANO PREFECTURE NANSHIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY**

No.8 2024

CONTENTS

Preface	Mitsuo W. TAKEDA	1
Paper • Review		
Development of Hybrid Rocket Ground Support Equipment	Yoichi MATSUBARA	2
Cutter Location Data Generation for All Types of Barrel Tool in Five-Axis Machining	Ken OKAMOTO, Koichi MORISHIGE	8
Estimation of Complex Dielectric Function and Derivation of Dispersion Relation of Electromagnetic Wave by Using Terahertz Time Domain Spectroscopy	Mitsuo W. TAKEDA, Hideaki KITAHARA	14
Technical Report		
Micro Hydro Power Generation Experiment Using Multiple Impact Water Turbine in Lake Oshiba	Hidemi KURITA, Katsumi KURASAWA, Shun MIYAJIMA, Mitsuo W. TAKEDA	27
Case Study		
Publication of Research Paper in the Academic Journal Small —Research into Dramatically Lowering the Growth Temperature of Ruby Single Crystals—	Shunsuke AYUZAWA	38
Vocational Ability Development Junior College and University Transfer	Mitsuo W. TAKEDA	40
Illuminations created in Collaboration with Minamiminowa Elementary School 6th Grade Class 1	Yuji YANAGISAWA	50
“Comprehensive Inquiry Class” at Ina Yayoigaoka High School —Learning Communication Design—	Shunsuke AYUZAWA	54
Research, Education, and Social Activities		55
Editor's Note		65

巻頭言

紀要第8号の発刊

長野県南信工科短期大学校・校長 武田三男

長野県南信工科短期大学校は、地域の課題に対して本校で培った「ものづくりのスペシャリスト」としての専門知識と技能を生かして周囲の人とも協同して解決策を積極的に見いだす新しい「地域中核人材」の育成を目指しています。また、本校は教育活動に加えて科学技術の研究を通して地域貢献を推し進めてゆきます。

本紀要の目的は、本校の教職員が行った研究・教育・社会活動等の取組とその成果を公表し、本校の活動をご理解いただくことです。昨年度（令和5年度 [2023年度]）1年間の本校の活動をまとめて紹介いたします。主な内容は以下の4項目から構成されています。

「論文（原著論文および解説（レビュー）」）ここでは、オリジナルな研究成果の発表である原著論文とこれまでの研究成果をまとめて編集紹介する解説（レビュー）を掲載します。原著論文として、「ハイブリッドロケット地上支援設備の開発」を掲載しました。解説として「あらゆるバレル工具に対応した5軸制御加工のための工具経路生成」および「テラヘルツ時間領域分光法による誘電関数の導出と電磁波分散関係の決定（その1）」を掲載します。

「技術資料」ここでは、特色ある「研究活動」、「総合課題」および「卒業研究」の中からいくつかを選んで紹介します。本号では、研究活動の中から「大芝湖におけるマイクロ水力発電実験」を掲載します。

「事例紹介」ここでは、教育・研究活動の代表例を紹介します。研究活動として、「学術雑誌 Small への研究論文掲載について—ルビー単結晶の大幅な育成低温化に関する研究—」を、また、学生のキャリアパスに新しい選択肢として昨年度から認められた編入学制度についての考察「職業能力開発短期大学校と編入学制度」を紹介します。近郊の高等学校や小学校における教育活動では「南箕輪小学校6年1組とコラボしたイルミネーションの製作」および「伊那弥生ヶ丘高校の「総合的な探究の時間」—コミュニケーションデザインを学ぶ—」を掲載します。

「研究・教育・社会活動の概要」ここでは、この一年間に教職員と学生が取り組んだ研究・教育・社会活動を一覧表にまとめました。

昨年度も新型コロナウイルス禍で授業形態の変更や登校制限、式典等の自粛をせざるを得ない状況下でしたが、十分な教育・研究成果を上げるよう努力した成果をまとめたものです。昨年度から編入学特区に採択され、長野県内の4年制大学への編入学が認められ、学生のキャリアパスに新しい選択肢が拓けました。このためには「教育の質保証」が不可欠となります。本校のカリキュラムの改編と大学との単位互換制度の整備を進めています。また、教員の教育活動充実のためにはその土台となる研究スキルの向上が求められます。本紀要が本校の活動内容を皆様にご理解いただく一助になればと願っています。忌憚のないご意見を賜れば幸甚です。With Corona の状況下においても、本校においては地域の皆様のご期待に応えるべく、座学ではDX利用の授業形態を模索しつつ、実験実習重視のカリキュラムにより高い技術・技能の修得した地域中核人材である「ものづくりのスペシャリスト」の育成をめざしてゆきます。今後とも本校への変わりないご理解とご支援をお願い申し上げます。

【原著論文】

ハイブリッドロケット地上支援設備の開発

松原洋一*

Development of Hybrid Rocket Ground Support Equipment

Yoichi MATSUBARA

あらまし ハイブリッドロケットの打上試験においては、ロケットへの燃料供給等の配管や点火までの制御を担うシステムが必要となる。SUWA 小型ロケットプロジェクトでは、湖岸に設置したオペレーションを行う本部と諏訪湖上の射場との間を無線で通信を行う地上支援設備を開発した。複数回の打上試験を行い、すべてにおいて想定した打上げを実施することに成功し、ロケット開発に役立てることができた。

Summary In the launch test of a hybrid rocket, a system to control the fuel supply piping and ignition of the rocket is required. In the SUWA rocket project, a ground support system was developed to provide wireless communication between the operation headquarters on the seawall and the launch site on Lake Suwa. We conducted several launch tests and were able to conduct the expected launches in all cases, which was useful for the development of the rocket.

Key Words : Hybrid rocket, SUWA Rocket Project (SRP), Ground Support Equipment (GSE)

1. まえがき

ハイブリッドロケットとは、固体燃料と液体もしくは気体の酸化剤を使用したロケットである。固体燃料には樹脂材料などを使用するため、固体ロケットや液体ロケットと比べ比較的 안전한ロケットである。このため、打上げの運用・管理コストを大幅に削減でき、多くの研究機関が開発を行っている。SUWA 小型ロケットプロジェクト (SRP) では、このハイブリッドロケット開発を行っており、筆者もメンバーとして参加している。また、2021 年からは南信工短ロケットクラブを立ち上げ、学生やOBも試験や設計等に協力している。

ハイブリッドロケットの打上試験では、酸化剤の供給を行う配管や、点火の制御するための地上支援設備 (GSE) が必要となる。地上支援設備は射場に配置され、100m ほど離れた本部からの指令でバルブ等の開閉を行う。また、酸化剤タンク圧力などの必

要な情報を本部で取得する必要もある。従来は有線ケーブルを敷設し、制御信号と情報のやりとりを実施していた。

SRP では、打上試験を諏訪湖上で実施することとした。安全のため湖岸からではなく湖上に台船を設置し、台船上から打上げることとなった。本部は湖岸に置くため、射場である台船とは約 700m の距離があり有線ケーブルを敷設することはできない。そこで、無線を用いた GSE 制御システムを開発した。無線の場合は、有線と異なり信号の遅延や通信エラーも起こりうるため、従来のシステムとは設計思想を変更する必要がある。

本研究では、射場側と本部側の双方にパソコンを置き、特定小電力無線を使用して必要な指令と情報を通信するシステムを開発し、実際の打上試験などで動作の確認を行った。

2. 地上支援設備 (GSE)

2.1 GSE の構成

GSE の構成図を Fig. 1 に示す。酸化剤である亜酸化窒素 (N_2O) はフィルバルブを通してロケットに接続しており、ランチシステムを通じてロケット内のタンクに充填される。タンクが満充填になるとベント

受理 2024 年 9 月 27 日

採択 2024 年 11 月 11 日

*長野県南信工科短期大学校 電気システム学科、
南箕輪村

Department of Electrical Systems Engineering,
Nagano Prefecture Nanshin Institute of Technology,
8304-190 Minamiminowa, Nagano, 399-4511 Japan

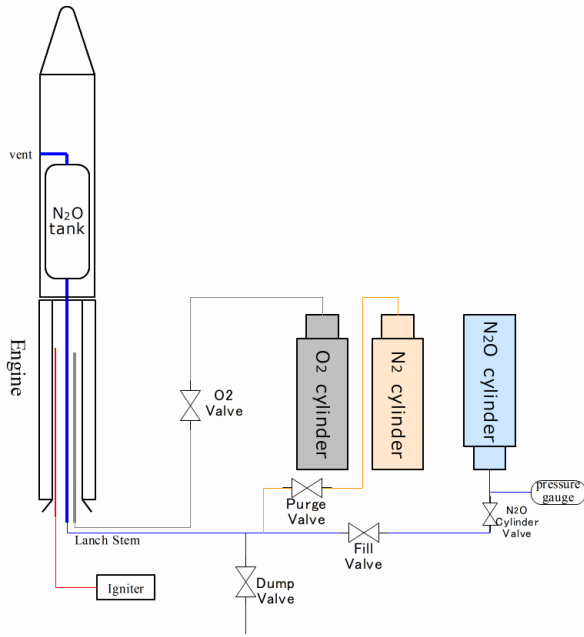


Fig. 1 GSE configuration

から酸化剤が放出されるため、ベントを観察することで充填されたかどうかを確認することができる。酸素は予備燃焼用に使用し、エンジン内に酸素を供給している状態で、イグナイターを用いてエンジン内にスパーク放電を起こすことにより予備燃焼を行う。予備燃焼によりランチステムを固定していたバンドが焼き切れ、ランチステムが外れることにより、亜酸化窒素がエンジン内に供給され、本燃焼にいたる。

配管には供給を制御するバルブが設置されている。酸素バルブは電磁バルブであるが、それ以外は空圧バルブであり、窒素を用いてバルブを駆動する。その窒素の制御には電磁弁を使用している。Figure 1では簡略化してバルブのみ記載した。なお、亜酸化窒素ポンベに設置されている N₂O Cylinder valve は手動で開閉するバルブになる。

亜酸化窒素ポンベには圧力計を設置している。亜酸化窒素ポンベは所定の圧力になるようよう加温しており、圧力計により圧力の測定と本部や射場での監視を行う。

打上シーケンスにおけるバルブとイグナイターの状態を Table 1 に示す。N₂O Cylinder valve 以外は、GSE 制御システムでの遠隔制御が必要になる。特に、点火の際は、フィルバルブを閉じた直後に、酸素バルブを開くと同時にイグナイターを ON して点火するため、タイミングが重要になる。

Table 1 Valve and igniter status in launch sequence

State in launch sequence	N2O Cylinder valve	Fill valve	Dump valve	Purge valve	O2 valve	Igniter
Ignition sequence start	Close	Close	Close	Close	Close	OFF
N2O opening	Open	↓	↓	↓	↓	↓
Start filling N2O	↓	Open	↓	↓	↓	↓
Confirmation that N2O is filled	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Begin 10-second countdown to ignition	↓	↓	↓	↓	↓	↓
0.5 seconds before ignition	↓	Close	↓	↓	↓	↓
Ignition	↓	↓	↓	↓	Open	ON
The launch stem is disconnected and the rocket is launched for main	↓	↓	↓	↓	↓	↓
End of ignition sequence	↓	↓	↓	↓	Close	OFF
Closing sequence start	↓	↓	↓	↓	↓	↓
N2O closing	Close	↓	↓	↓	↓	↓
Starts releasing gas in piping	↓	Open	Open	↓	↓	↓
Finished releasing gas in piping	↓	Close	Close	↓	↓	↓
Nitrogen purge started	↓	↓	↓	Open	↓	↓
Nitrogen purge finished	↓	↓	↓	Close	↓	↓

2. 2 GSE 制御システムの構成

GSE 制御システムの構成図を Fig. 2 に示す。射点側のシステムと本部側のシステムがあり、どちらもパソコン (PC) を用いて制御する。

射点側にはバルブ・イグナイター・亜酸化窒素ポンベ加温用ヒーターの ON/OFF を行うために、デジタル I/O を使用する。デジタル I/O はパソコンと USB で接続しており、パソコンからの指令で指定の信号を ON/OFF できる。亜酸化窒素ポンベの圧力計の値および風速計の値は、データロガーを経由してパソコンに取得する。風速計は射点の風速を本部にてモニタリングするために設置する。

本部との通信には、特定小電力無線モデムを使用する。使用する周波数は 1216MHz である。打ち上げを行うロケットには 429MHz や 920MHz 帯の無線を使用しているため、それと干渉しない周波数帯を選択した。

その他に、LTE 対応カメラを設置している。これは、亜酸化窒素のタンクへの充填を確認するために使用する

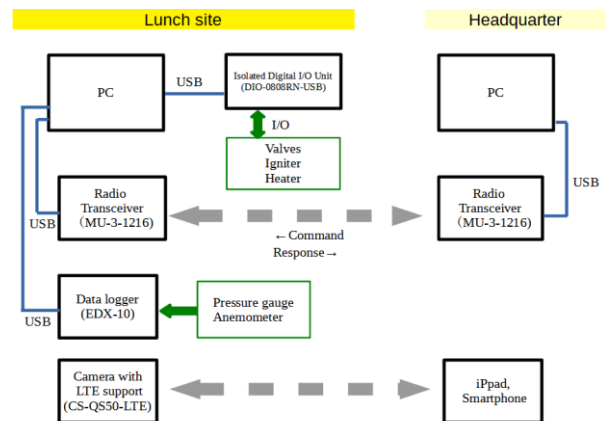


Fig. 2 GSE control system configuration diagram

る。射点の映像をパソコンを介さずに本部へライブ配信できる。亜酸化窒素の充填確認時にのみ映像を確認すれば良いので、LTE の通信量はそれほどかからない。

2. 3 制御ソフトウェア

専用のソフトウェアを作成しそれぞれのパソコン上で動作させる。開発環境は Visual Studio 2013 を使用し開発言語は C++ を使用した。

2. 3. 1 ソフトウェアの画面と操作機能

ソフトウェアの画面を Fig. 3 に示す。本部側のソフトウェアでは、各デジタル信号の ON/OFF 制御/表示および、いくつかの信号制御をまとめて実行するボタンを有する。また、N₂O ボンベ圧力と風速を表示する。

射点側は、各デジタル信号の ON/OFF 制御/表示機能を有する。通常は本部側の指令で動作するが、ローカル制御に切り替えることで、射点側での操作が可能になる。これは、配管・配線の確認時に必要な機能となる。

2. 3. 2 ソフトウェアの機能

射点側と本部側のソフトウェアは無線通信を行う。本部側からコマンドを送信し、射点側はその応答を返



Fig. 3 Software screen
(Top: Headquarter, Bottom: Lunch site)

信する。応答コマンドには、各 I/O の状態や圧力、風速などを含めて返信する。

通信は一定間隔（350ms 間隔）で常時行っている。射点側のソフトウェアは、通信が一定時間以上行われなかった場合には非常停止状態になり、その後は非常停止解除コマンドが本部側から送信されるまで一切の動作を行わない。

Figure 4 は点火シーケンスのフローチャートである。本部側からの指令で点火シーケンスを行う。従来の有線ケーブルを敷設した制御では、オペレータが各 I/O 信号を 1 つずつ ON/OFF させていた。しかし、今回の無線システムでは、通信が遅延したり一時的に途切れる可能性もあるため、時間が限られているシーケンスについては射点側のソフトウェアでシーケンスを進めることとした。具体的には、本部側で”点火シーケンス開始”ボタンを押すと、射点側のパソコンがカウントダウンを行い、指定の時間にフィルバルブを閉じて酸素バルブを開きイグナイターを ON にする。その他

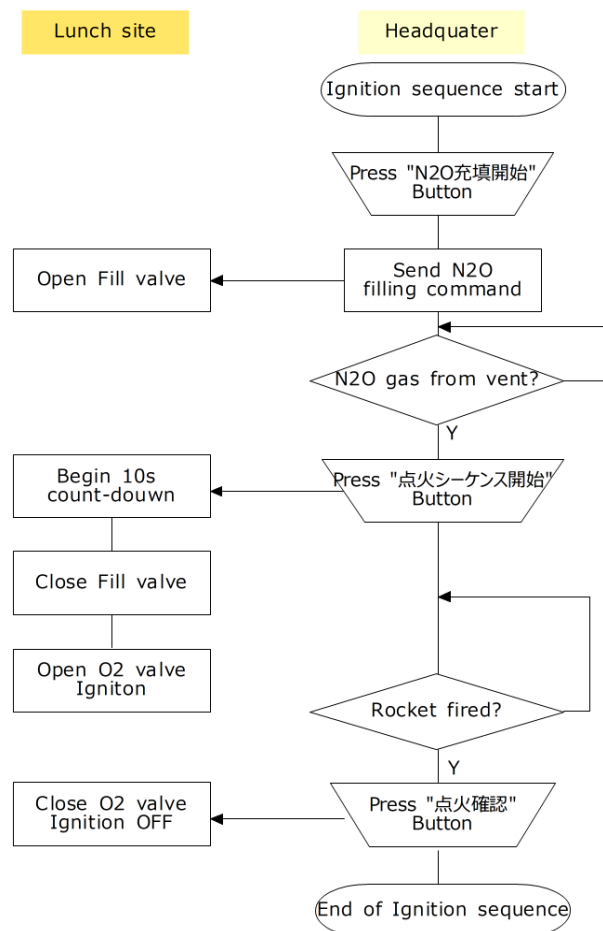


Fig. 4 Flowchart of ignition sequence

のバルブ操作は、オペレーターがフローに従ってボタンを押すことで実現することとした。

3. 実験

3.1 通信性能の実験

1216 MHz 帯の無線モデムの通信性能を測定するため、諏訪湖畔において通信テストを行った。使用したモデムは MU3-USB-1216 である。諏訪湖畔の岡谷多目的広場と、対岸の①岡谷市立湊小学校付近、②諏訪湖ヨットハーバーのそれぞれ地上高 3.6 m にアンテナを設置して通信試験を行った。受信信号強度インジケータ (RSSI) の値を調べた結果を Table 2 に示す。①湊小学校は水平距離が約 1 km 程度であり、RSSI は十分に高く、パケットロスもなく良好に受信できた。②ヨットハーバーは 4.2km とかなり離れており RSSI は通信限界値程度であった。パケットロスも 3～4 割程度と多かった。実際の本部と射点の距離は 700m 程度であり、今回の実験①よりも近い距離であるため、通信には問題無いと判断できる。

3.2 打上試験

事前の燃焼試験において、GSE の動作を確認した。その後、2020 年 3 月に実際のロケットの打上試験を行った。

Figure 5 のように、諏訪湖上に台船を固定した。湖底に杭を打ち込むことで台船をしっかりと固定し、波で揺れることもない。台船上では Fig. 6 のようにロケットや GSE を設置した。PC および PC に接続するデバイス (デジタル I/O, 無線モジュール, 電源など) は防水ボックスに収納している。図では PC がむき出しで



Fig. 5 Launch site (on the barge) as seen from the headquarters

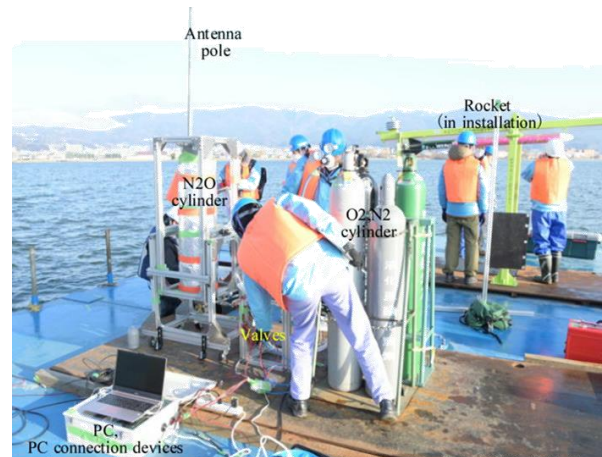


Fig. 6 GSE installed on a barge



Fig. 7 Rocket Launching

あるが、打ち上げ時には防水ボックスのフタを閉めることで収納される。

打上は滞りなく実施でき、Fig. 7 のようにロケットを正常に打ち上げることが出来た。

また、2022 年 3 月にも同様に台船上から打ち上げを行い、こちらも全て正常に動作することができた。

Table 2 Wireless modem communication performance measurement results

Transmission point	Horizontal distance	RSSI [dB]
① Around Minato Elementary School	970m	-89 ~ -85
② Suwako yacht harbor	4200m	-113 ~ -109

4. バルブシステム追加に伴う機能追加

2023年3月の打上試験では、亜酸化窒素の供給方式を変更した。これまでは、ロケットのエンジン側からランチシステムを通して供給していたが、新たにロケットの側面から供給することとした¹⁾。機体内にバルブと電動アクチュエータを設置し、機体外側に亜酸化窒素の配管を切り離す単軸スライダを2軸設置した。また、配管を切り離す前に、配管の脱圧をするため、配管の圧力を計測する圧力計を設置した。

4.1 追加した GSE の構成

これらの機能追加に伴い、GSE の構成を変更した。変更後の構成図を Fig. 8 に、GSE の制御システムを Fig. 9 示す。

機体内のバルブは三方弁になっており、亜酸化窒素をタンクに供給した後、電動アクチュエータでバルブを回転させることで、タンクからエンジンに亜酸化窒素を供給し本燃焼させることができる。

機能を追加したロケット側面からの亜酸化窒素供給配管は発射直前にロケットから切り離す必要があり、そのための単軸スライダを2軸備える。このスライダは新しく設置したデジタル I/O ユニットの介してスライダのコントローラに接続することで、PC から制御を行うことができる。切り離し動作は、フィルバルブを閉めてダンプバルブを開け、配管内の圧力が十分に

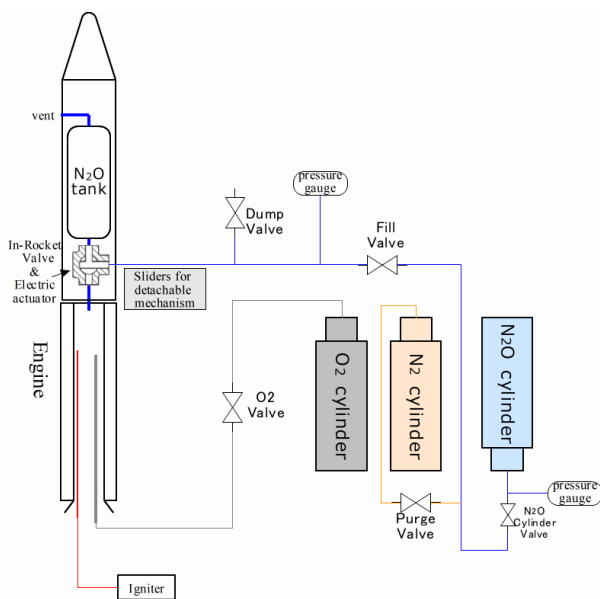


Fig. 8 Modified GSE configuration

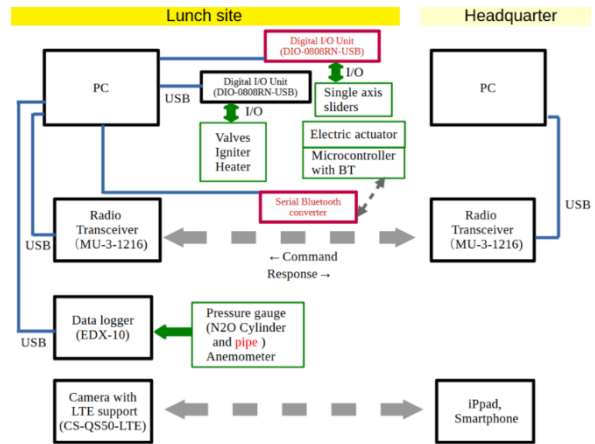


Fig. 9 GSE control system configuration diagram with added functions

低くなるのを計測してから実施する。そのために圧力計を新設し、データロガーを介して PC で監視を行う。

機体内バルブを動かす電動アクチュエータはマイコンにより制御され、マイコンと射点の PC とは Bluetooth を使用した無線通信を行う。配管を切り離した後、PC からの指令で電動アクチュエータを回転させることで亜酸化窒素をエンジンに供給し本燃焼させることができる。

4.2 打上試験

2022年3月と2023年3月に打上試験を実施した。これらの実験では、湖岸から諏訪湖に向かって打ち上げを実施した。2023年の打上げの様子を Fig. 10 に示す。どちらの試験も問題なく実施でき、ロケットを打ち上げることができた。



Fig. 10 Launch of the rocket in 2023

5. むすび

ハイブリッドロケット打上試験のための地上支援設備を開発し、計4回の打ち上げを行い、いずれも予定通り打ち上げに成功した。

無線通信制御とすることで指令本部と射点との距離をとることができ、湖上からの打ち上げを実施できた。また、パソコンとソフトウェアによる制御とすることで、機能の追加にも柔軟に対応できた。

謝 辞

本稿は、「小型ロケット製作を通じたものづくり技術の高度化と人材育成」（プロジェクトマネージャ：中山昇，通称SUWA小型ロケットプロジェクト）のもとで実施した成果をまとめたものである。SUWA小型ロケットプロジェクトのメンバーはじめ関連機関に感謝申し上げます。また、南信工科短大ロケットクラブのメンバーに深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 中山 昇, 榊 和彦, 松原 洋一, 片寄 真也, 露口 諒, 和田 光史: 酸化剤供給システムとバルブシステムを搭載したハイブリッドロケットの開発: 日本機械学会 2023 年度年次大会, S191-02, (2023).

【解説】

あらゆるバレル工具に対応した5軸制御加工のための工具経路生成

岡本 謙^{*, **}・森重功一^{**}

Cutter Location Data Generation for All Types of Barrel Tool in Five-Axis Machining

Ken OKAMOTO^{*, **}, Koichi MORISHIGE^{**}

あらまし 航空機部品に代表される複雑形状部品の加工には、高精度な加工面を高い生産性で実現することが強く求められている。近年、側刃の曲率半径が非常に大きいバレル工具が利用されている。バレル工具は、ピックフィードが大きくても表面粗さを滑らかに仕上げる事が可能で、生産性が高い。現在、バレル工具には、バレル型、テーパ型、オーバル型、レンズ型といった様々な形状が提案されている。これら複雑な形状の工具すべてに対して、切削点に基づいた刃物位置データが、汎用的な単一の計算式で求められることが望ましい。本研究では、あらゆる形状のバレル工具に対応可能な工具形状データフォーマットを提案し、そのデータフォーマットを利用した工具経路生成法を示す。

Summary In the machining of complex-shaped parts such as aircraft parts, there is a strong demand for high-precision machined surfaces with high productivity. Recently, barrel tools with extremely large radius of curvature of cutting edges have been used. Barrel tools enable smooth surface finishing and high productivity even with a large pick feed. Currently, there are various shapes of barrel tools such as barrel-shape, taper-shape, oval-shape, and lens-shape. For all of these complex tool shape, it is desirable to be able to calculate the cutter location data from the cutting point with a single generalized formula. In this study, we propose the data format for all types of barrel tool, and introduce a tool path generation method based on the proposed data format.

Key Words : CAM, Five-Axis Machining, Cutter Location, Barrel Tools, Toolpath Generation

1. はじめに

航空機部品のような複雑形状部品の加工では、高精度な表面加工と高い生産性が強く求められる。現代の工作機械は、複数の工程を集約することができる多機能・多自由度化の方向へと進化を遂げている¹⁾。

ボールエンドミルを用いて自由曲面を加工する場合、

加工面にカスプと呼ばれる切削痕が残る。入り組んだ複雑形状を加工する場合、工具の干渉を避けるために小径のボールエンドミルを選択する必要がある。しかし、カスプ高さが増加しないようにピックフィード幅を小さくする必要があり、加工能率の悪化につながる。

近年では、高効率な仕上げ加工を目指して、ボールエンドミルとは異なる特殊な形状のバレル工具が登場した。このバレル工具は、切れ刃の曲率半径が非常に大きく設計されている。Figure 1 に示すように、生産性が高い大きなピックフィード幅を設定しても、滑らかな仕上げ面が得られる。現在、バレル工具には、Fig. 2 のように Barrel 型や Oval 型, Taper 型, Lens 型など、様々な形状が提案されている。これらバレル工具は、Fig. 1(b) のように工具を傾斜させて使用するため、5 軸制御加工の適用が必要である。先行研究では、バレル工具を用いてカスプ高さが目標値以下となる切削点を得る方法や、工具姿勢を連続的に変化させながら干渉のない工具経路を生成する方法を提案してきた²⁾。

受理 2024 年 10 月 3 日

採択 2024 年 11 月 14 日

*長野県南信工科短期大学校 機械システム学科、
南箕輪村

Department of Mechanical Systems Engineering,
Nagano Prefecture Nanshin Institute of Technology,
8304-190 Minaminowa, Nagano, 399-4511 Japan

**電気通信大学大学院 情報理工学研究科

機械知能システム学専攻、調布市

Department of Mechanical and Intelligent Systems
Engineering,

Graduate School of Informatics and Engineering,
The University of Electro-Communications

1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585, Japan

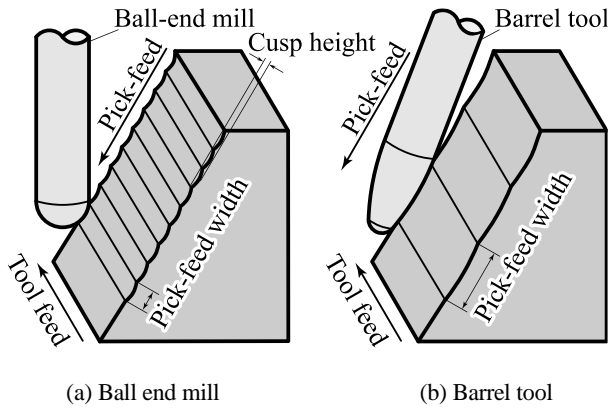


Fig. 1 Comparison of pick feed widths.

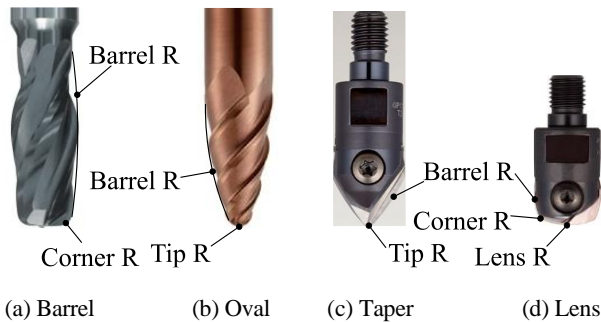


Fig. 2 Four types of barrel tools ^{3),4)}.

課題としては、工具タイプごとに刃物位置 (Cutter Location: CL) ⁵⁾ データの計算方法を変更しなければならないことが挙げられる。従来のボールエンドミルの場合、切削点と指令点の位置関係は、Fig. 3(a)に示すように工具姿勢によらず常に一定である。従って、与えられた切削点を加工面の法線ベクトル方向へボール半径だけオフセットすることで、指令点は容易に求められる。一方、バレル工具の場合、Fig. 3(b)に示すように切削点と指令点の位置関係が工具姿勢によって変化してしまう。バレル工具による5軸制御加工を実現するためには、工具形状に基づいて正確な指令点の座標を算出する必要がある。あらゆる形状のバレル工具に対応するためには、汎用的な単一の計算式に基づいてCLデータを算出できることが望ましい。

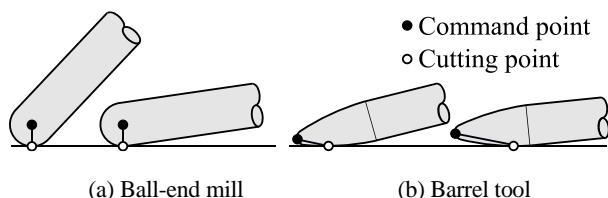


Fig. 3 Positional relationship between command and cutting points.

Yu ⁶⁾ は、工具形状に依存しない汎用的な CL データの計算方法として、ドイツ工業規格 DIN 66215 ⁷⁾ で定義された全てのフライス工具に対応する計算方法を提

案している。DIN 66215 は、Fig. 4 に示すように工具の形状を2本の直線と単一のフィレット半径で定義している。この規格は、ボールエンドミル、ブルノーズエンドミル、ドリルのような比較的シンプルな形状のフライス工具を定義することができる。しかし DIN 66215 は、Fig. 2 に示すような複数の円弧形状を持つバレル工具を定義することはできない。

本研究の目的は、仕上げ加工用のバレル工具を戦略的に利用することができる工具経路生成手法を開発することである。まず、あらゆる形状の仕上げ用バレル工具を定義することができる汎用的な工具形状データフォーマットを提案する。DIN 66215 規格を拡張することで、複雑な形状を持つバレル工具を定義することが可能な、パラメトリックなデータ構造を提案する。続いて、提案する工具形状データフォーマットに基づいて CL データを求めるための、単一の計算式を示す。汎用的なデータフォーマットと CL データの計算法によって、今後開発される新しい工具形状であっても、画一化された手順で5軸制御加工を実現することができるようになる。最後に、提案する工具形状データフォーマットに基づいた工具経路生成手法を紹介する ⁸⁾。

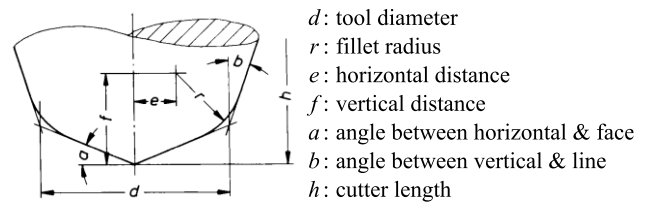


Fig. 4 Tool geometry as defined by DIN 66215 ⁷⁾.

2. 加工面と工具姿勢の定義

本研究ではパラメトリック曲面上のアイソパラメトリック曲線に基づいて工具経路を生成する、iso-parametric 法について言及する。加工対象の曲面は CAD ソフトウェアによって Non-Uniformed Rational B-Spline (NURBS) ⁹⁾ として定義され、次の式(1)のように表される。

$$S = S(u, v) \quad (1)$$

ここで u と v は、パラメトリック曲面 S のパラメータである。Figure 5 に示すように、ここでは加工面 S のピックフィード方向のパラメータを u 、工具送り方向のパラメータを v としている。切削点は $P_{i,j}$ で表され、 $i = \{0, 1, \dots, M\}$ はピックフィード方向に、 $j = \{0, 1, \dots, N\}$ は工具送り方向に対応している。任意の点

における単位法線ベクトル \mathbf{n} は, 次の式(2)で求めることができる。

$$\mathbf{n} = \frac{\frac{\partial \mathbf{S}}{\partial u} \times \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial v}}{\left| \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial u} \times \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial v} \right|} \quad (2)$$

工具送り方向を示すベクトル \mathbf{F} は, 法線ベクトル \mathbf{n} に対して直角になうよう, 次の式(3)で定義する。

$$\mathbf{F} = \mathbf{R}(\mathbf{n}, \pi/2) \{ \mathbf{n} \times (\mathbf{P}_{i,j+1} - \mathbf{P}_{i,j}) \} \quad (3)$$

ここで, $\mathbf{R}(\mathbf{x}, \alpha)$ は, ベクトル \mathbf{x} の周りに α だけ回転させる変換マトリクスを示す。また, $\mathbf{P}_{i,j+1}$ は, 切削点 $\mathbf{P}_{i,j}$ に対して隣接する次の切削点を示す。

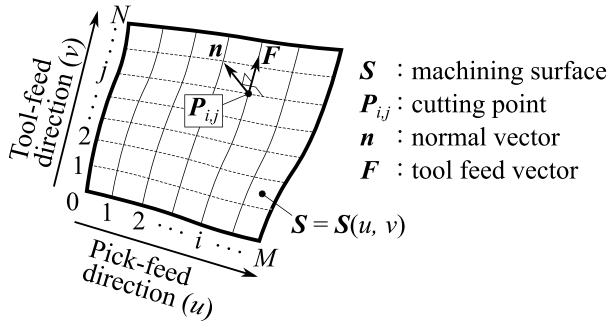


Fig. 5 Definition of machining surface.

Figure 6 に示すように, 切削点 $\mathbf{P}_{i,j}$ を原点とし, 工具送り方向を \mathbf{X} 軸, 法線ベクトル \mathbf{n} の方向を \mathbf{Z} 軸, \mathbf{X} と \mathbf{Z} の外積を \mathbf{Y} 軸とした座標系を設定する。これを切削点座標系と呼ぶ。切削点 $\mathbf{P}_{i,j}$ における工具姿勢は, 工具軸ベクトル \mathbf{T} で表される。 \mathbf{T} は \mathbf{Z} 軸に対する傾斜角 θ と, \mathbf{Z} 軸周りの旋回角 ϕ の 2 つのパラメータによって決定される。工具軸ベクトル \mathbf{T} は, 以下の式(4)で求めることができる。

$$\mathbf{T} = \mathbf{R}(\mathbf{n}, \phi) \mathbf{R}(\mathbf{n} \times \mathbf{F}, \theta) \mathbf{n} \quad (4)$$

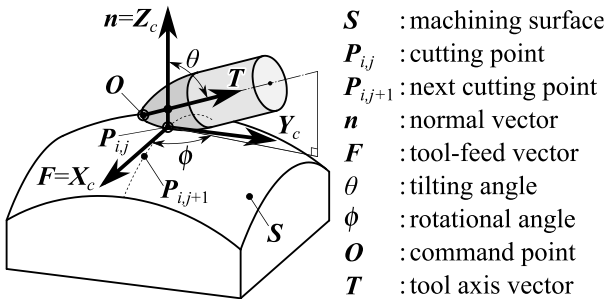


Fig. 6 Definition of tool posture in the cutting point coordinate system.

3. 工具経路の生成法

本研究では, 先に挙げたような多種多様なバレル工具を定義できるように, DIN 66215 による工具形状定義に対し, 円弧部分を n 個に拡張した新しいフォーマットを提案する。まず, Fig. 7 に示すように, 工具の先端点を原点とした工具座標系 $\{\mathbf{X}_t, \mathbf{Z}_t\}$ を定義する。工具情報データフォーマットは, n 個の切れ刃 $r_0 \sim r_{n-1}$, 各切れ刃の接線角 $\psi_0 \sim \psi_{n+2}$, 底面直径 d_b の 3 つのパラメータで定義される。

次に, $\mathbf{X}_t - \mathbf{Z}_t$ 平面上に, 与えられた $r_0 \sim r_{n-1}$, $\psi_0 \sim \psi_{n+2}$, d_b を用いて, 直線と正接円弧を工具の輪郭線として描く。 r と ψ から, 切れ刃 r_i の円弧中心 $\mathbf{O}_i = \{O_{ix}, O_{iy}\}$ を順次計算して, 工具情報として格納する。得られた輪郭線を \mathbf{Z}_t 軸に対して回転させることで, バレル工具の NURBS 曲面を得る。

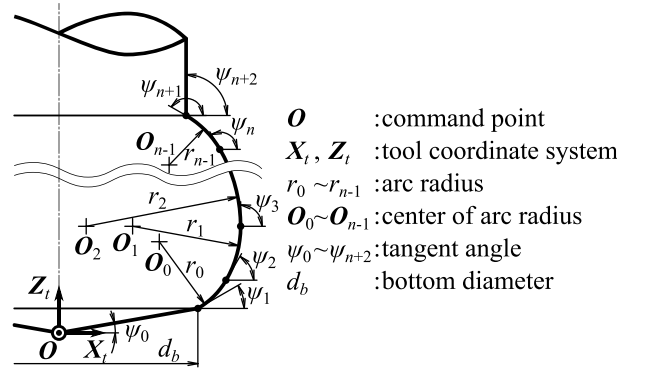


Fig. 7 Dimensioning of general barrel tool.

フライス工具は, 工具中心軸付近の切れ刃では切削速度が遅く, 工具摩耗の悪化や, むしれやバリの発生といった表面粗さの悪化につながる¹⁰⁾。工具に傾斜角 θ を与えることで, 切削速度を適切に維持して, 表面粗さを向上させることができる。バレル工具の場合は, 生産性向上のため, Fig. 1 (b) のように傾斜角 θ を大きくし, 工具を倒して加工するフランク加工が一般的である。

まず, 傾斜角 θ と工具形状データフォーマットの正接角 ψ を比較して, 接する切れ刃 r_i を特定する。例えば Fig. 8 (a) では, $\psi_2 < \theta < \psi_3$ であるため切れ刃 r_1 が選定され, Fig. 8 (b) では, $\psi_3 < \theta < \psi_4$ であるため, 切れ刃 r_2 が選定される。

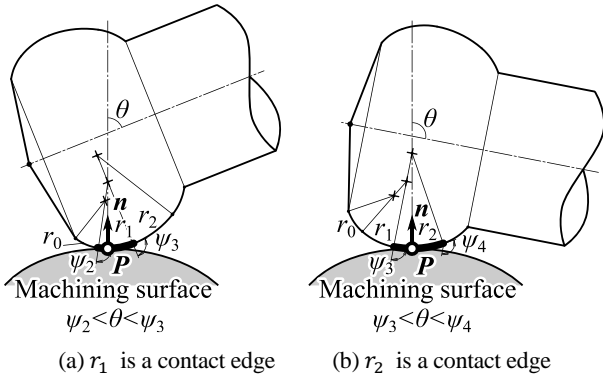


Fig. 8 By comparing θ and ψ , it is possible to identify which cutting edge r is in contact with the machining surface.

続いて、Fig. 9 に示すように、特定された切れ刃 r_i と傾斜角 θ より、旋回角 ϕ を無視した工具先端点 O_θ を求める。切削点における加工面の単位法線ベクトルに切れ刃半径 r_i を乗算して、切れ刃 r_i の円弧中心 O_i を求める。工具座標系による成分表示 $O_i = \{O_{ix}, O_{iy}\}$ を用いることで、 $O_\theta - O_i$ と Z_t 軸のなす角は、 $\tan^{-1} O_{ix}/O_{iz}$ と表すことができる。したがって、傾斜角 θ と工具先端点 O_θ の関係は、次の式(5)から求めることができる。

$$O_\theta = r_i n - |O_i| R \left(X_t \times Z_t, \theta + \tan^{-1} \frac{O_{ix}}{O_{iz}} \right) n \quad (5)$$

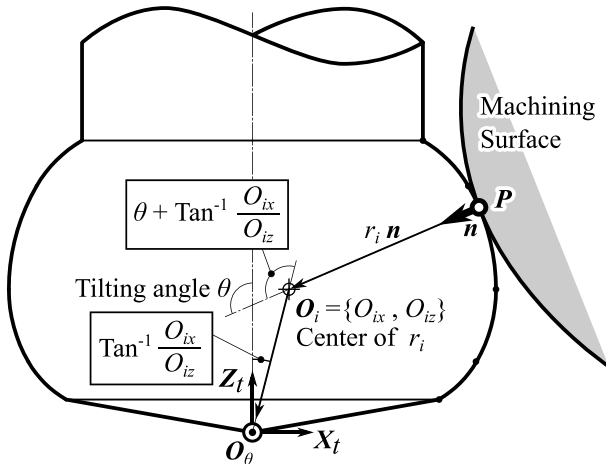


Fig. 9 Calculation of tool center point using tool coordinate system.

旋回角 ϕ は、傾斜角 θ とは異なり、工具の接点に影響を与えない。旋回角は、工具の接触点を変えずに、工具軸の向きをさらに制御することを可能にする。これは、干渉回避に利用される。さらに旋回角 ϕ は、カスプ高さや切削抵抗に影響を及ぼす¹¹⁾ため、旋回角の制御は重要である。

旋回角の影響を計算するために、得られた工具先端点 O_θ について、Fig. 10 のように法線ベクトル n 周りに ϕ 回転させる。最後に切削点の座標 P を加算して平行移動させることで、CL データとして出力するための指令点を得る。

$$O = R(n, \phi) O_\theta + P \quad (6)$$

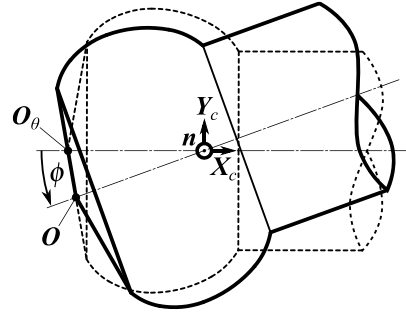


Fig. 10 Effect of rotation angle ϕ around normal vector n .

生成した工具の NURBS 曲面を、オイラー角を用いて切削点座標系へと回転移動させる。切削点座標系へ移動させることで、加工面モデルに対する干渉計算に用いることができる。今回は、Z-X-Z 軸の順に回転するオイラー角を用いた。次の手順で、工具の NURBS 曲面を、角度 α , β , γ の順に回転させる。

1. 工具軸 Z_t と、法線ベクトル n の外積 $Z \times n$ を求める。
2. Z_t 軸まわりに角度 α だけ回転させる。
3. $Z_t \times n$ 軸まわりに角度 β だけ回転させる。
4. n 軸まわりに角度 γ 回転させる。

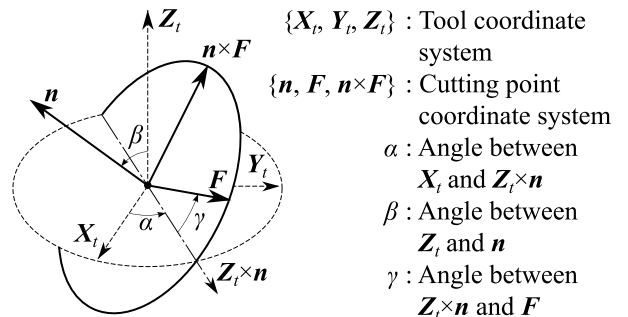


Fig. 11 Rotational transformation of the NURBS surface of the barrel tool using Euler angle.

4. ケーススタディ

提案するバレル工具のデータ構造を利用して、CL データを生成した。データ構造の実装は、オープンソース CAM カーネル Kodatuno¹²⁾を利用した。開発言語は C++ である。

Figure 12 は、今回のケーススタディで使用する工具である。Fig. 12(b)は、Barrel & Lens 型と呼ばれ、Barrel 型と Lens 型を組み合わせた複合的な工具である。これらの工具はそれぞれ複数の半径の切れ刃を持つことから、DIN 66215 では表現することが不可能な形状である。

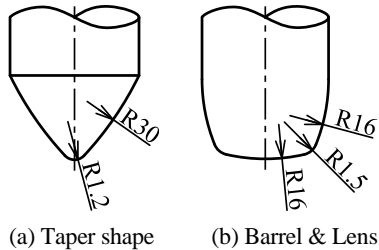


Fig. 12 Used tools for case study.

Figure 13 は、ケーススタディで使用する加工面である。滑らかな凹凸形状の立壁であり、バレル工具による効率的な加工が期待できる形状である。

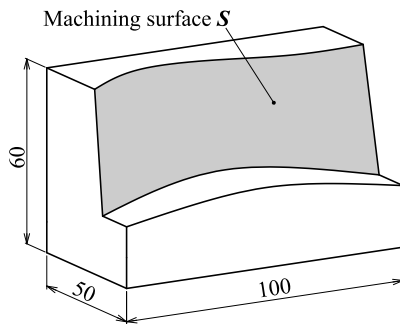


Fig. 13 Target machining surface.

提案するバレル工具のデータ構造を利用して、CL データを生成した。Figure 14 は、実際に CL データを生成した結果である。意図したとおりに加工面 S に切れ刃が接して、CL データが正しく生成されることを確認した。

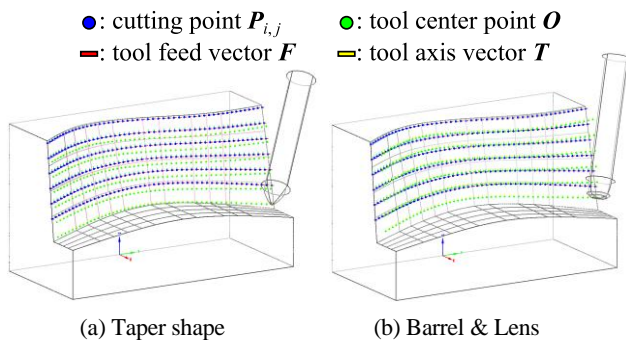


Fig. 14 Results of CL data generation.

5. 結論

本研究では、すべてのバレル工具形状に対応した CL データの生成法を提案・開発した。ケーススタディとして 2 種類の異なるバレル工具に対する CL データの生成結果を示した。結果として次の結論を得た。

1. DIN66215 規格を拡張することで、多種多様な形状のバレル工具を定義できる汎用的な工具形状データフォーマットを提案した。
2. 提案する工具形状データフォーマットに基づいて CL データを求めるための、単一の計算式を示した。
3. 提案するデータ構造を利用して、工具経路を正しく生成することができた。

謝 辞

本研究は、南信工科短大振興会研究補助金により実施された。

参 考 文 献

- 1) K. Nakamoto and Y. Takeuchi, 'Recent advances in multi-axis control and multitasking machining', International Journal of Automation Technology, vol. 11, no. 2, pp. 140–154, Mar. 2017, doi: 10.20965/ijat.2017.p0140.
- 2) T. Suzuki, K. Okamoto, and K. Morishige, 'Tool path generation for five-axis controlled machining of free-form surfaces using a barrel tool considering continuity of tool postures', International Journal of Automation Technology, vol. 15, no. 6, pp. 885–892, Nov. 2021, doi: 10.20965/ijat.2021.p0885.
- 3) ISO, ISO 3592 - Industrial automation systems — Numerical control of machines — NC processor output — File structure and language format. 2000.
- 4) G. Yu, 'General Tool Correction for Five-Axis Milling', Int J Adv Manuf Technol, vol. 10, pp. 374–378, 1995.
- 5) DIN, DIN 66215-1: Programming of numerically controlled machines; CLDATA, general structure and record types . 1974.
- 6) K. Okamoto, H. Ishihara, and K. Morishige, 'Cutter Location Data Generation for All Types of Barrel Tool in Five-Axis Machining', in The International Conference on Leading Edge Manufacturing/Materials&Processing LEM&P 2023, Jun. 2023, pp. 86–89.
- 7) OSG Corporation, 'Variant Shape Tool for Finishing VU-R Series'. https://www.osg.co.jp/media_dl/flier/file/c_93.pdf

- 8) EMUGE-FRANKEN, 'Circle Segment End Mills', [Online]. Available: www.frankenexpert.com
- 9) L. Piegl, 'On NURBS: A Survey', IEEE Comput Graph Appl, vol. 11, no. 1, pp. 55–71, 1991, doi: 10.1109/38.67702.
- 10) X. Chen, J. Zhao, and W. Zhang, 'Influence of milling modes and tool postures on the milled surface for multi-axis finish ball-end milling', The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2014 77:9, vol. 77, no. 9, pp. 2035–2050, Nov. 2014, doi: 10.1007/S00170-014-6547-3.
- 11) E. Ozturk, L. T. Tunc, and E. Budak, 'Investigation of lead and tilt angle effects in 5-axis ball-end milling processes', Int J Mach Tools Manuf, vol. 49, no. 14, pp. 1053–1062, Nov. 2009, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2009.07.013.
- 12) K. Takasugi, T. Kumasaka, and N. Asakawa, 'Development of Platform-Independent Open CAM Kernel', in Proc. of the 6th Int. Conf. on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, 2011, p. 3354.

【解説】

テラヘルツ時間領域分光法による複素誘電関数の決定と電磁波分散関係の導出（その1）

武田三男*, 北原英明**

Estimation of Complex Dielectric Function and Derivation of Dispersion Relation of Electromagnetic Wave by Using Terahertz Time Domain Spectroscopy

Mitsuo W. TAKEDA* and Hideaki KITAHARA**

あらまし 電磁波は閉じられた空間内や媒質（物質）中では周囲と相互作用し、伝播特性に媒質等の特色が現れる。逆にこの性質を利用して、媒質等を選ぶことにより電磁波の伝播特性を制御することが可能である。物質の電磁波（電場）に対する応答関数が複素誘電関数 $\epsilon(\omega)$ である。 $\epsilon(\omega)$ は物質中の原子や分子などの励起状態等を直接反映している。一方、電磁波の伝播特性を端的に表すのが分散関係である。電磁波の場合、分散関係とはその振動数 ω と波数ベクトル k との間の関係 $\omega(k)$ である。本稿ではテラヘルツ時間領域分光法の原理と、それを用いた複素誘電関数の決定および電磁波の分散関係の導出方法を紹介する。前半（その1）では、時間領域分光法の原理と誘電体の極性フォノン・金属や半導体中の自由担体・アモルファスのボゾンピークの測定結果を紹介しその特性を議論する。後半（その2）では、矩形導波管中の分散関係・フォトニック結晶におけるバンドギャップと局在モード・強誘電体中のフォノン・ポラリトン分散関係の測定結果について紹介し、その特性について議論する。

Summary Electromagnetic waves interact with surrounding matters so that the propagating characteristics appear. By choosing a medium we can control the propagating characteristics. Dispersion relation expresses the characteristics. In the electromagnetic wave dispersion relation is that between frequency ω and wavevector k , that is $\omega(k)$. Here we review principle of terahertz time domain spectroscopy. Then we explain how to estimate the complex dielectric function and to evaluate the dispersion relation. For instance we introduce experimental results regarding the dielectric function of a polar phonon mode in the ferroelectrics, of a carrier in metals and semiconductors and Boson peaks in the amorphous materials. Regarding dispersion relation we discuss cutoff frequency in a rectangular wave guide, bandgap in a photonic crystal, the phonon polariton in the ferroelectrics.

Key Words : Electromagnetic wave, Propagating characteristics, THz-TDS, Dielectric function, Dispersion relation, ferroelectrics, Lorentzian, Drude type, amorphous, Boson peak, photonic crystal, photonic band, phonon polariton.

受理 2024年 8月 28日
採択 2024年 10月 4日

- *¹長野県南信工科短期大学校, 南箕輪村
Nagano Prefecture Nanshin Institute of Technology,
Minamiminowa, Nagano, 399-4511 Japan
*²信州大学, 理学部, 松本市
Faculty of Science, Shinshu University,
Asahi, Matsumoto, Nagano, 390-8621 Japan
*³香港科技大學(廣州), 功能樞紐先進材料學域, 廣州
HKUST(GZ), Advanced Materials Thrust of the
Function Hub, Guangzhou, China
**福井大学, 遠赤外領域開発センター, 福井市
RCDFIR, University of Fukui,
Bunkyo, Fukui, 901-8503 Japan

1. まえがき

これまで、誘電関数（または複素誘電率ともいう： $\epsilon(\omega) = \epsilon'(\omega) + \epsilon''(\omega)$ ）の決定においては、通常の赤外分光法では透過強度スペクトルにクラマース・クローニッヒの関係式を適応して算出したり、フォノンモードがローレンツ型共鳴で表されると仮定したモデルを、赤外吸収やラマン散乱スペクトルをフィティングしたりするなどして誘電率 $\epsilon'(\omega)$ および誘電損失 $\epsilon''(\omega)$ を導出するなどの方法がとられていた^{1~4)}。この場合はどうしても積分領域の制限や仮定したモデルによる任意性が問題となっている。

また、媒質中の電磁波の分散関係を直接的に測定する方法は限られていた。例えば結晶中のフォノンについては角度依存ブリルアン散乱や中性子非弾性散乱を用いることができる。しかしながら、角度依存ブリルアン散乱ではごく低い波数領域の音響フォノン等の測定に限られ、また、中性子散乱は原子炉等の極めて大掛な設備が不可欠であり手軽に利用することは容易ではない。

ここで紹介するテラヘルツ時間領域分光法 (Terahertz Time Domain Spectroscopy: THz-TDS) は電磁波の電場振幅を時間の関数 (時間波形) として検出し、それを時間でフーリエ変換する測定方法であり、電場の強度のみでなく振幅と位相の両方の振動数依存性 (スペクトル) を同時に得ることができる。したがって、時間領域分光法では、試料を設置していないときの参照信号と比較することにより、位相差スペクトルが求められる。すなわち、誘電損失に直接関係する位相差 (遅れ) も測定できることから誘電関数の実部と虚部を同時になんらかの仮定を伴うことなく決定することが可能である⁵⁻¹³⁾。

次に、電磁波の分散関係について紹介する。波数ベクトル $k(\omega)$ は試料中にいくつの波が立っているかを表していることから、試料の厚さを d とすると波数 (角波数) k と位相差スペクトル $\phi(\omega)$ の関係は $k(\omega) = \phi(\omega) / d$ で表される。実際の測定では、電磁波の伝搬方向も指定できるので波数ベクトルと k と振動数 ω の関係である電磁波の分散関係 $\omega(k)$ を位相差スペクトルから直ちに決定することができる。

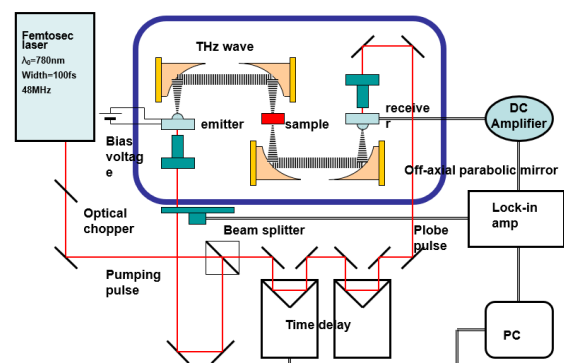
本稿では、最初にTHz-TDSの原理と実際の装置を紹介し、誘電関数決定の原理と方法および電磁波の分散関係の導出方法について述べる。最後に、それぞれの測定例を紹介しその特性について議論する。

2. テラヘルツ時間領域分光法

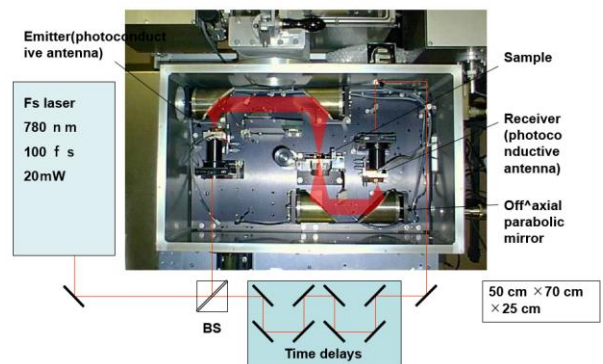
THz-TDS の透過型の光学系の概念図を Fig. 1-1(a)に、研究室で使用していた分光装置の写真を Fig. 1-1(b)に示す¹²⁾。光学系は、励起用超短パルスフェムト秒レーザー、時間遅延回路、発振素子、試料設置台、受信素子により構成されている。光学的な時間遅延回路 (Time delay) によりサンプリング時間を遅らせて検出しそれを時系列にした、いわゆる時系列サンプリング方式を

用いている。ここでは、抽出した各時間の入力 (パルスレーザーにより励起された光伝導アンテナから発信される THz 電磁波) はいつも同じ出力であると仮定している。受信素子でサンプリングされた電気信号を、ロックインアンプ等で増幅した時間波形 (電場振幅の時間依存性) をワークステーションに取り込み、データ処理する。

試料の中には、もともと反射率が高かったり誘電損失が大きく透過測定が可能な薄い試料を作製することが困難であったりする物質がかなり存在する。この場合は反射スペクトルから物質の誘電関数等を求めることができる。この他にも薄膜の誘電関数を測定するために使用される浅い角度からの入射させた反射光を検出するエリプソメーターも開発されている。



(a)



(b)

Fig.1-1 (a) Schematic drawing and (b) photograph of THz-TDS. Optical system is composed with fs-pulse laser, emitter and receiver, time delay, and sample holder.¹²⁾

Figure 1-2 に光伝導アンテナの概念図を示す。半絶縁半導体の SI-GaAs の表面に低温(室温)でエピタキシャル成長させた LT-GaAs 薄膜が積層されている。その上に金が電極として蒸着されている。低温成長した GaAs は光を照射されると表面にキャリアが励起されるいわゆる光伝導半導体(photoconductive semiconductor)である⁵⁾。

金電極間に電圧をかけた状態で外部光を電極間のギャップ領域に照射すると GaAs 表面に光励起されたキャリアが電極間に電流として流れる。これは、荷電粒子が加速度運動することを意味し、その結果、電極ギャップ領域の LT-GaAs 薄膜から電磁波が発生する。励起光源としては超短パルスレーザーが使用される。レーザーパルスの発光時間の半値幅が 100fs のフェムト秒パルス光を照射すれば不確定性原理 ($\Delta t \Delta \omega \approx \hbar$) から THz 周波数帯の電磁波が発生する。

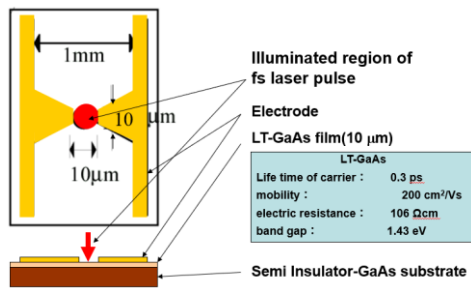
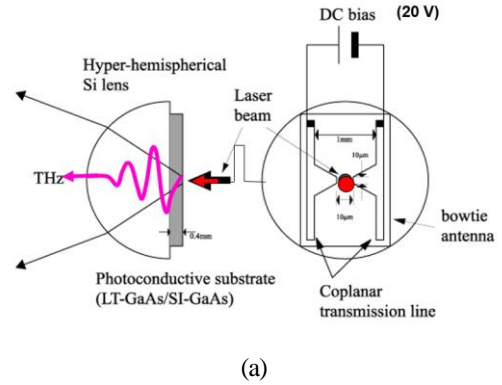


Fig. 1-2 Schematic drawing of photoconductive antenna. LT-GaAs film is grown epitaxially on surface of GaAs substrate. Gold co-planar electrode lines are deposited on LT-GaAs film.⁵⁾

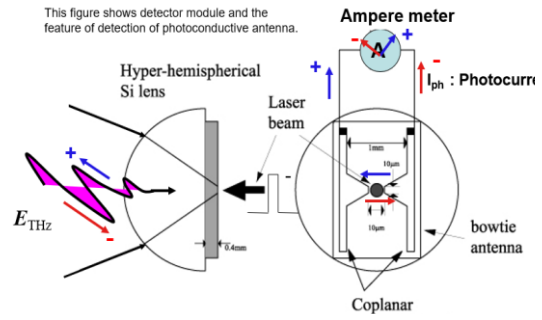
Figure 1-3 (a)と(b)に THz 発信および受信モジュールによる発信と受信の概念図を示す。モジュールの構造はどちらも全く同じで、Fig. 1-2 に示した光伝導アンテナが高抵抗シリコン製超半球レンズの平面側にシリコングリース等により密着されている。発信素子として使用する場合は、電極間に直流電圧を印加しておき、電極のギャップ領域にパルス光を照射すると励起光のパルス幅に逆比例した振動数の電磁波が放出される^{8,9)}。

Figure 1-4 に光伝導アンテナ素子からの電磁波の発生の課程を模式的に示す。(a)電極間に電圧を掛けるとギャップ間に分極が生じる。(b)レーザーをギャップの間に見える Si 基板上的光伝導半導体 (LT-GaAs) に照射するとギャップ間にパルス状の電流が流れる。(c)この荷電粒子(電子とキャリア)の加速度運動により電磁波電磁波が発生する。それぞれの時間依存性は、分極は階段関数、電流はローレンツ型関数そして発生する THz 電磁波はそのローレンツ型関数の時間による一階微分となって

いる(式(1-1))。電極と反対側に放射された THz 電磁波はレンズまたは反射鏡によって集光され測定試料に導かれる。



(a)



(b)

Fig. 1-3 Schematic drawing of (a) emitter and (b) receiver modules that are the same ones. Photoconductive antenna is attached on hyper-semi-spherical Si lens with silicon grease.^{8,9)}

$$E(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2 r} \ddot{\mathbf{P}}(t) \sin\theta$$

$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2 r} \dot{\mathbf{J}}(t) \sin\theta \quad (1-1)$$

試料から透過もしくは反射した電磁波は受信素子で検出される。Figure 1-3(b)に示すように、超半球レンズにより集光された THz 波の電場がアンテナの電極間に光誘起電流を流す。電流の方向は印加された電磁波の電場の方向に流れ、その大きさ(電場振幅)は電場に比例する。したがって、電極間に流れる電流を電流計で測定すれば受信素子に照射された THz 電磁波の「大きさ」と「符合」を測定することができる。すなわち、受光素子からは電流パルスの形で電場振幅を符合を含んだ時間波形 ($E(t)$) で取り出すことができる。

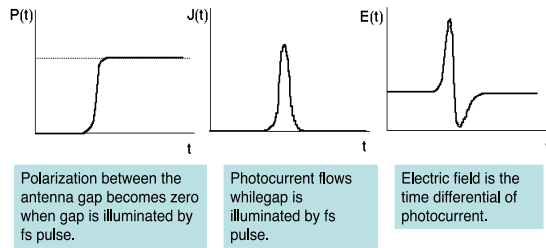


Fig. 1-4 Schematic drawing of generating process of electromagnetic wave from photoconductive antenna. (a) polarization between co-planer lines gap, (b) photocurrent flow, and (c) electric field.¹²⁾

3. 導出原理

測定により試料を透過 (または反射) した電場振幅の時間波形 $E_{\text{sam}}(t)$ と資料を設置していない参照として用いる電場振幅の時間波形 $E_{\text{ref}}(t)$ とを測定する。

Figure 1-5 に THz-TDS で測定した電場振幅の時間依存性 (時間波形) の例を示す。黒い実線は試料がない場合の参照波形 $E_{\text{ref}}(t)$ を、赤い実線は試料を透過した後の波形 $E_{\text{sam}}(t)$ をそれぞれ示す。参照波形の 2 番目のピークは並行平板試料の後ろの面 (出射面) で反射された波が入射面で反射されて再び出射面を透過した多重反射のピークである。試料を透過した電場振幅波形はその強度が減衰し、位相が遅れることが確認できる。

これらの参照波形 $E_{\text{ref}}(t)$ および透過波形 $E_{\text{sam}}(t)$ を時間でフーリエ変換すると電磁波の周波数領域の複素電場振幅 $E_{\text{ref}}(\omega)$ と $E_{\text{sam}}(\omega)$ を得る (式(1-2a)および(1-2b))。ここで、 $r(\omega)$ と $\theta(\omega)$ はそれぞれ電場振幅と位相の振動数依存である¹²⁾。

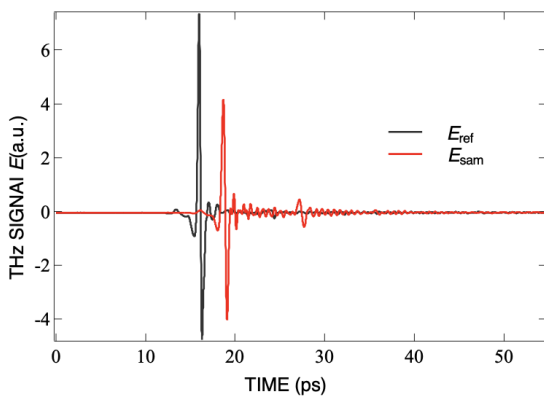


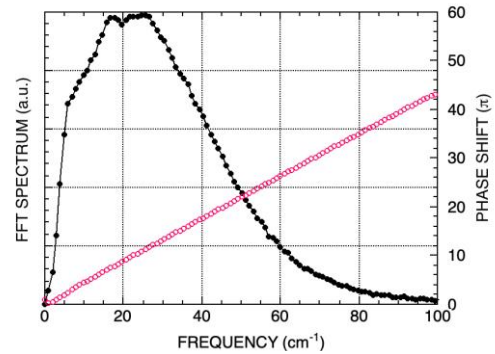
Fig. 1-5 Time dependence of amplitude of electric field measured by THz-TDS (wave form). Black curve shows waveform without sample and red one shows that with sample.

$$E_{\text{ref}}(\omega) = r_{\text{ref}}(\omega) \exp(i\theta_{\text{ref}}(\omega))$$

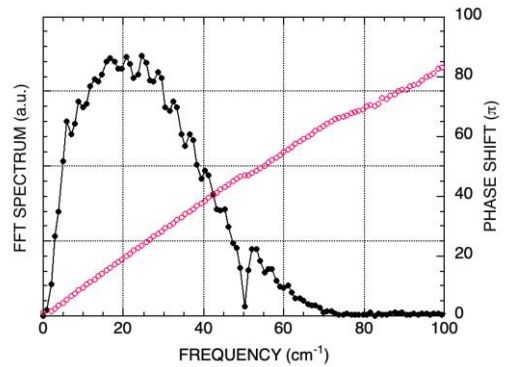
$$= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E_{\text{ref}}(t) \exp(-i\omega t) dt \quad (1-2a)$$

$$E_{\text{sam}}(\omega) = r_{\text{sam}}(\omega) \exp(i\theta_{\text{sam}}(\omega))$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E_{\text{sam}}(t) \exp(-i\omega t) dt \quad (1-2b)$$



(a)



(b)

Fig. 1-6 Electric field amplitude (black solid circles) and phase (red open ones) spectra (a) without and (b) with sample calculated by Fourier transformation.

測定例として、Fig. 1-6(a)に参照波形をフーリエ変換して得た電磁波の電場振幅のスペクトルを黒の実線および位相スペクトルを赤丸で示す。THz-TDS 装置では 23.3 cm⁻¹ (0.7 THz) を中心に 6.66 cm⁻¹ (0.2 THz) から 100 cm⁻¹ (3.0 THz) までの比較的広帯域の振動数領域での分光が可能であることが確認できる。Figure 1-6(b)に強誘電体 Li₂Ge₇O₁₅(LGO)¹³⁾の平行平板試料を透過した THz 波形をフーリエ変換して得た電場振幅のスペクトル (黒の実線) および位相スペクトル (赤丸) を示す。電場振幅には LGO の極性フォノンに起因する吸

収が 50 cm^{-1} に見られる。また、全領域に見られる鋭い波状の凹凸の繰返しは図 5 で説明した並行平板試料の多重反射による干渉効果に起因する。位相シフトのグラフは傾きが大きくなっており、位相が試料整理を透過中に遅れていくことがわかる。また、ステップ状の変調は前述の干渉効果である。

これらのスペクトルから以下の式により、屈折率 $n(\omega)$ で厚さ d の試料の透過電場強度スペクトル $T(\omega)$ と透過電場位相スペクトル $\phi(\omega)$ が計算できる。

$$T(\omega) = \left[\frac{E_{\text{sam}}}{E_{\text{ref}}} \right]^2 \quad (1-3)$$

$$\begin{aligned} \phi(\omega) &= \theta_{\text{sam}}(\omega) - \theta_{\text{ref}}(\omega) \\ &= \left(\frac{\omega}{c} \right) \{n(\omega) - 1\}d \end{aligned} \quad (1-4)$$

ここで、式(1-4)の $\phi(\omega)$ の左辺の第 2 項は試料の厚さ d の補正項である。

算出した透過率（電場強度）と位相シフトスペクトルの例として LGO のスペクトルを Fig.1-7 に示す¹³⁾。黒の実線が透過強度、赤丸が位相シフトである。透過率の 50 cm^{-1} 近傍に極性フォノンによると考えられる鋭い吸収が確認できる。一方、位相シフトでは対応する振動数領域に大きなステップ状の変化が見られる。これは、フォノンによる吸収によって電磁波の位相が遅れることを表している。尚、透過率の全領域に見られる鋭い凹凸の繰返しは上述の並行平板試料の後ろの面（出射面）で反射された波が入射面で反射されて再び出射面を透過した多重反射による干渉効果に起因する。（Fig. 1-5 および Fig. 1-6 の説明を参照。）

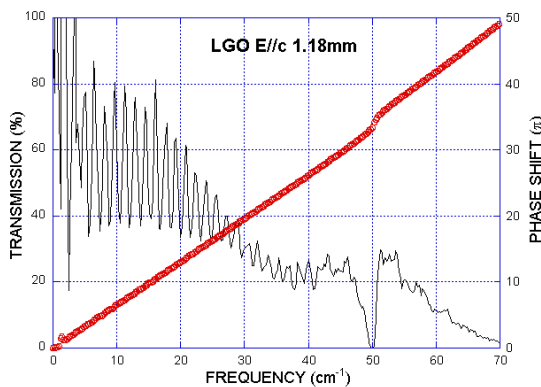


Fig. 1-7 Transmission $T(\omega)$ and phase shift $\phi(\omega)$ spectra calculated in terms of eq. (1-3) and eq. (1-4).

次節で詳しく述べるようにこれら 2 つのスペクトルから誘電関数の実部である誘電率と虚部である誘電損失を任意性なしに決定することができる。

3. 1 誘電関数の決定

従来の赤外分光法では試料の誘電関数を透過または反射スペクトルをクラマース・クローニッヒの式により解析して導出してきた。この導出には、原理的にいくつかの任意性が含まれるため正確な値を得るのが難しかった。本稿で紹介している THz-TDS は前述のよう電場振幅と位相スペクトルを同時に独立して導出することができることから誘電関数（誘電率と誘電損失の振動数スペクトル）を任意性なく決定することが可能である。以下にその原理と方法を示す¹²⁾。

THz-TDS では平行平板の試料を使用することが多いためここでも平行平板試料について説明する。入射した電磁波のほとんどは出射面から透過してゆくが誘電率の高い試料ではかなりの部分が出射面で試料内へ反射され再び出射面に向かう（Fig. 1-8）。

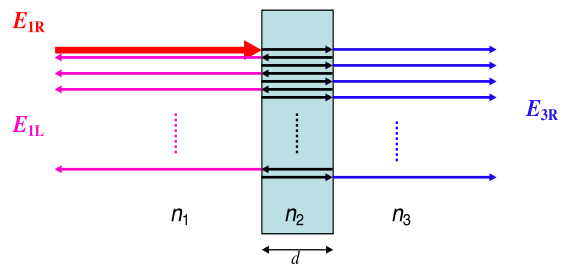


Fig. 1-8 Transmission properties of electromagnetic wave in parallel-plate specimen. Effect of multiple reflection in specimen should be considered.

この多重反射を考慮すると入射光 (E_{1R}) による透過光 (E_{3R}) と反射光 (E_{1L}) はそれぞれ下記の式で表される。透過測定の場合は、透過光 (E_{3R}) と反射光 (E_{1L}) がそれぞれ $E_{\text{ref}}(\omega)$ と $E_{\text{sam}}(\omega)$ に対応する。

$$\frac{E_{3R}}{E_{1R}} = \frac{4n_2 e^{-ikd}}{(n_2 + 1)^2 e^{-in_2 kd} - (n_2 - 1)^2 e^{in_2 kd}} \quad (1-5a)$$

$$\frac{E_{1L}}{E_{1R}} = \frac{(n_2^2 - 1)(e^{in_2 kd} - e^{-in_2 kd})}{(n_2 + 1)^2 e^{-in_2 kd} - (n_2 - 1)^2 e^{in_2 kd}} \quad (1-5b)$$

また、上式から誘電率 (ϵ') と誘電損失 (ϵ'') を導くには以下の複素屈折率との関係を用いる。

$$\hat{n} = n + ik \Rightarrow \epsilon' + i\epsilon'' \quad (1-6)$$

$$\epsilon' = n^2 + \kappa^2 \quad (1-7a)$$

$$\epsilon'' = 2n\kappa \quad (1-7b)$$

Figure 1-9に Fig. 1-7の LGOの透過率 (電場強度) と位相シフトスペクトルから上式により求めた誘電関数を示す。青色の丸が誘電率であり赤丸が誘電損失スペクトルである。50 cm^{-1} に極性フォノンに起因する典型的なローレンツ型関数が見られる¹³⁾。

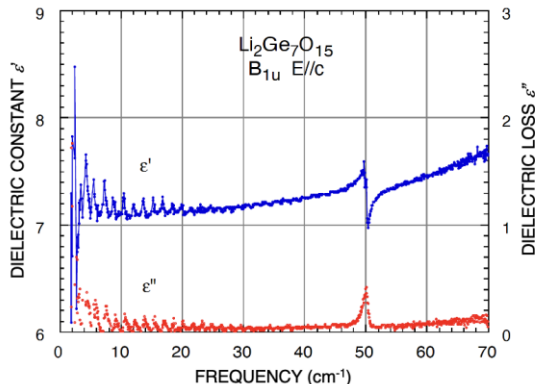


Fig. 1-9 Dielectric functions of LGO. Blue circles show dielectric constant $\epsilon'(\omega)$ and red ones show dielectric loss $\epsilon''(\omega)$.

3. 2 分散関係 $\omega(k)$ の導出

分散関係は媒質中の電磁波の伝播特性を的確に把握することができる。電磁波は何も制約がない真空中では波数 k と振動数 ω の間の分散関係 $\omega(k)$ は、 $\omega = ck$ 、すなわち傾き c の直線となる。これは光線 (Light line) と呼ばれている。空間的に一様な屈折率 n を持つ媒質中では光の速度 v は n 分の 1 ($v = c/n$) となり、分散関係は、

$$\omega = \{c/n(\omega)\}k \quad (1-8)$$

と表される。前述のように、波数 k は単位長さ当たりの波の数 $k = 2\pi/\lambda$ である。また、位相差は厚さ d の試料中を伝播するときの波の位相差 ϕ は $\phi = d/\lambda$ である。このことから、波数 k と位相差 ϕ の関係は、 $k = 2\pi\phi/d$ で表される。すなわち、位相差スペクトル $\phi(\omega)$ から直ちに電磁波の分散関係 $k(\omega)$ 、もしくはその逆数の分散関

係 $\omega(k)$ を式 (1-4) および式 (1-8) から決定することができる¹²⁾。

$$k(\omega) = \phi(\omega)/d + \omega/c \quad (1-9)$$

分散関係が分かればその微分から電磁波の群速度 v_g を計算することができる。

$$v_g = d\omega/dk \quad (1-10)$$

また、光学的状態密度(optical density of state) D_{photon} は群速度の逆数であるから、

$$D_{\text{photon}} = 1/v_g = dk/d\omega \quad (1-11)$$

と導くことができる。後述のようにフォトニック結晶やメタマテリアルにおける光の局在の議論では局在モードの群速度や状態密度が重要となる。THz-TDS では位相シフトスペクトルから直接これらの物理量を決定することが可能である。

電磁波が強誘電体のような結晶中に入射すると極性格子振動と相互作用してフォノン・ポラリトンという結合波を形成する (フォノン・ポラリトンについては後半 (その2) で詳しく解説する)⁴⁾。Figure 1-10に分散関係 $\omega(k)$ の例として、誘電体のフォノン・ポラリトンの分散関係の概念図を示す。極性フォノンの縦波光学モード振動数 ω_{LO1} と横波光学モード振動数 ω_{TO1} の間にフォノン・ポラリトン特有のバンドギャップが出現する。ポラリトンの低振動数側の第1分枝は屈折率 $n = \sqrt{\epsilon(0)}$ の光線に沿って原点から増加してゆくがバンドギャップが存在するため波数が高くなるにつれて、 ω_{TO1} に近づいてゆく。一方、第2分枝は波数0で ω_{LO1} から出発するが波数が高くなるにつれて、 $n = \sqrt{\epsilon(\infty)}$ の光線に沿って増加する。

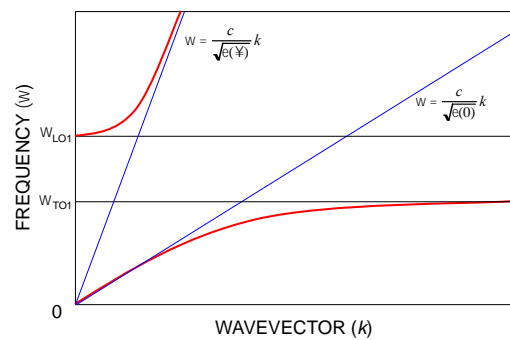
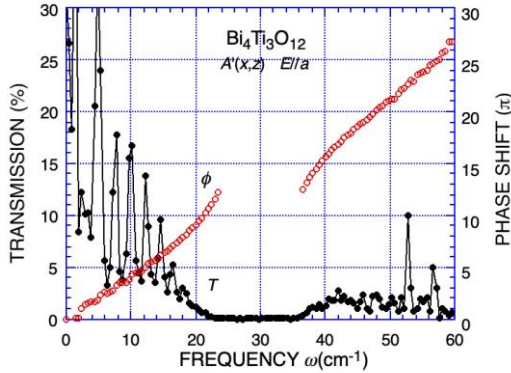


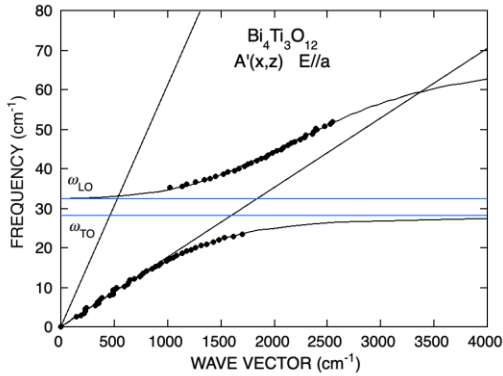
Fig. 1-10 Dispersion relation $\omega(k)$ of phonon polariton in dielectrics. Red curves show polariton branches and blue lines show asymptotic lines, respectively.

Figure 11(a)に強誘電体 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ の透過及び位相シフトスペクトルの測定結果を, Fig. 11(b)にその位相シフトから算出したフォノン・ポラリトン分散関係を示す。45 cm^{-1} 近傍にフォノン・ポラリトン特有のバンドギャップが確認できる。

フォノン・ポラリトンについては次節以降 (4.2.2) において詳しく議論する¹⁴⁻¹⁶⁾。



(a)



(b)

Fig. 1-11 (a) Transmission spectra of ferroelectrics $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ measured by THz-TDS. Black circles show transmission and red ones show phase shift. (b) Phonon polariton dispersion relation curves. Black circles show phase shifts. Black curves show phonon polariton dispersion curves and blue line show asymptotic one of the first branch.

4. 測定結果と考察

ここでは, 最初に複素誘電率導出の測定例として, ローレンツ型誘電分散を示す強誘電体 $\text{Li}_2\text{Ge}_7\text{O}_{15}$ の極性フォノンモード (4.1.1) とドルーデ型分散を示す半導

体シリコンにおける自由担体 (キャリア: carrier) (4.1.2) の測定結果を紹介する。また, アモルファスに特有のボゾンピーク (4.1.3) について紹介する。次に分散関係の測定例として矩形導波管中の伝播特性 (4.2.1), フォトニック結晶のフォトニックバンド (4.2.2) と強誘電体におけるフォノン・ポラリトン分散関係 (4.2.3) について紹介する。

4. 1 複素誘電率導出

4. 1. 1 極性フォノン

誘電体結晶中に電磁波が入射すると分極を伴う格子振動 (極性フォノン) と相互作用し, ローレンツ型の分散関係で表される電磁応答を示すことが知られている。ここでは, 格子振動の主役である原子の運動を, 減衰を伴う調和振動子として運動方程式を書き下し, 電磁波の電場 $E(t) = E_0 \exp(-i\omega t)$ による外力 $F(t) = eE_0 \exp(-i\omega t)$ が印加された強制振動と考える。1種類の振動子が一つだけ存在するとして比誘電関数 (比複素誘電率) を求めると式(1-10)が得られる^{2,3,15)}。

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\text{bg}} + \left(\frac{Ne^2}{\varepsilon_0 m_e} \right) \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\gamma} \quad (1-12)$$

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_{\text{bg}} + \left(\frac{Ne^2}{\varepsilon_0 m_e} \right) \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2} \quad (1-13a)$$

$$\varepsilon''(\omega) = \left(\frac{Ne^2}{\varepsilon_0 m_e} \right) \frac{\gamma \omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2} \quad (1-13b)$$

ここで, ε_{bg} はバックグラウンド誘電率, ω_0 , γ および N はそれぞれ固有振動の振動数, 減衰定数および個数, また, e と m_e は電子の電荷と質量である。

Figure 1-12 に誘電体のローレンツ型誘電関数の概念図 (グラフ) を示す。誘電率は TO モード振動数 ω_{TO} ($\equiv \omega_0$) と LO モード振動数 ω_{LO} ($\varepsilon'(\omega_{\text{LO}}) = 0$) の間で誘電率が負となる振動数領域が存在する。特に, LO モード振動数において誘電率は 0 を切る。

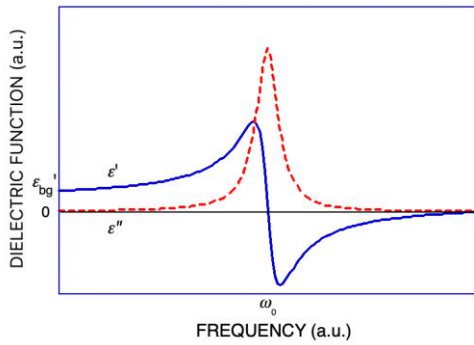
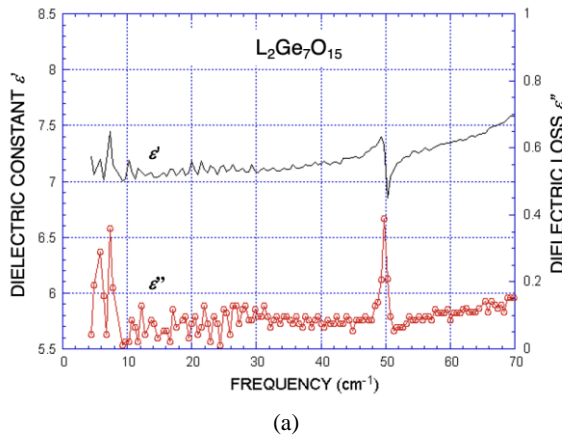
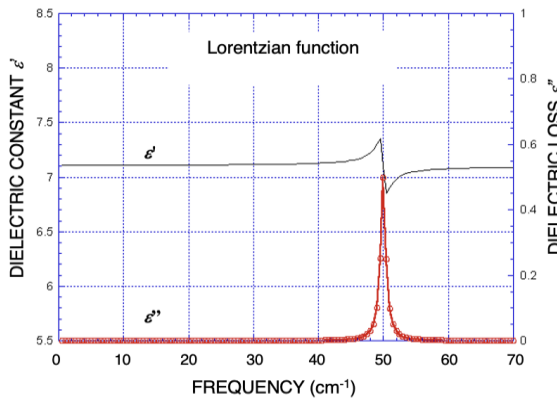


Fig. 1-12 Schematic drawing of Lorentz type dielectric functions. Blue curve shows dielectric constant $\epsilon'(\omega)$ and red broken one shows dielectric loss $\epsilon''(\omega)$, respectively.



(a)



(b)

Fig. 1-13 (a) Dielectric constant $\epsilon'(\omega)$ and dielectric loss $\epsilon''(\omega)$ estimated by transmission intensity and phase shift of $\text{Li}_2\text{Ge}_7\text{O}_{15}$ (Fig. 1-7). (b) Lorentz type dielectric functions corresponding to those in Fig. 1-13(a).

Figure 1-13 に実際に測定で得られた強誘電体 $\text{Li}_2\text{Ge}_7\text{O}_{15}$ の複素誘電率とそれらを、式(1-13a)および式

(1-13b)のローレンツ型関数にフィットさせた結果を示す。誘電関数に現れた異常分散は 50 cm^{-1} の極性フォノンモードに起因することが結論できる。

4.1.2 自由担体 (金属, 半導体)

金属や半導体中の電磁波は結晶格子を構成する原子より、自由電子やホール (正孔) などの自由担体 (キャリア) と相互作用する。キャリアの運動方程式にはバネによる復元力の項がないため、原子からの束縛をまったく受けない。このため、前述の格子振動の場合と同様に比誘電関数を求めると式(1-15)となる。これはドルーデ型分散関係と呼ばれてる。

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\text{bg}} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - i\gamma\omega} \quad (1-15)$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{e^2 N}{\epsilon_0 m^*}} \quad (1-16)$$

ここで、 ϵ_{bg} はキャリア以外の原子に束縛された電子による寄与等を含めたバックグラウンドの誘電率である。 m^* はキャリアの有効質量、 e は電荷、 N はキャリア濃度であり、 γ はキャリアの減衰定数で、平均散乱時間 τ の逆数で与えられる。また、 ω_p はプラズマ振動数と呼ばれ、式(1-16)で与えられる。式(1-15)を実部と虚部に分けてキャリアの比誘電率と比誘電損失は以下の式(1-17a)と(1-17b)と表される^{2,3,15)}。

$$\epsilon'(\omega) = \epsilon_{\text{bg}} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma^2} \quad (1-17a)$$

$$\epsilon''(\omega) = \frac{\omega_p^2 \gamma}{\omega(\omega^2 + \gamma^2)} \quad (1-17b)$$

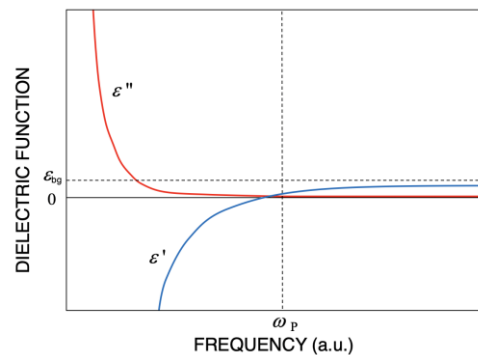


Fig. 1-14 Schematic drawing of Drude type dielectric functions. Blue curve shows dielectric constant $\epsilon'(\omega)$ and red one shows dielectric loss $\epsilon''(\omega)$, respectively.

Figure 1-14 にドルーデ型分散関係の概念図 (グラフ) を示す。誘電率はプラズマ振動数 ω_p 直下で負となり、急激に減少する。この振動数以下で電磁波は全反射する。一方、誘電損失は急激に増大してゆくことが分かる。Figure 1-15 にキャリア濃度が高く抵抗値小さい ($R = 6 \Omega \cdot \text{cm}$) n型半導体である低抵抗シリコンウエハーの平行平板試料の透過スペクトルを示す。抵抗値 ($R = 6 \Omega \cdot \text{cm}$) から換算したキャリア濃度 N は、移動度 $\mu = 1350 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ として、 $N = 1/e\mu R$ より $1.28 \times 10^9 \text{ mol}/\text{cm}^3$ となる。この N の値を式(3b)に代入するとプラズマ振動数 $\omega_p = 16.3 \text{ cm}^{-1}$ (489 GHz) が得られる。この値を使って、透過スペクトルから算出した複素誘電率を式(4a)と(4b)のドルーデ型関数にフィッティングした結果を Fig. 1-16 に示す。ここで、用いたフィッティングパラメータは、プラズマ振動数 $\omega_p = 16.3 \text{ cm}^{-1}$ 、減衰定数 $\gamma = 17 \text{ cm}^{-1}$ 、バックグラウンド誘電率 $\epsilon_{bg} = 11.5$ である。

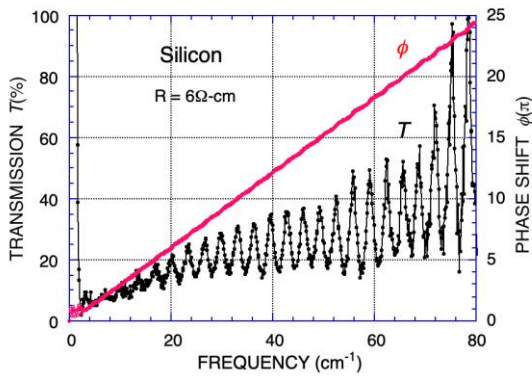


Fig. 1-15 Transmission $T(\omega)$ and phase shift $\phi(\omega)$ spectra of Si wafer with low resistance $R = 6 \Omega\text{-cm}$ measured by THz-TDS. Black circles show $T(\omega)$ and red ones show phase shift $\phi(\omega)$.

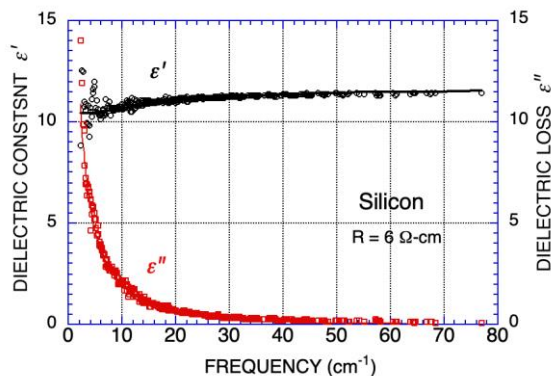


Fig. 1-16 Dielectric functions estimated by transmission intensity and phase shift of Fig. 1-15 with Drude type functions. Black legends show dielectric constant $\epsilon'(\omega)$ and red ones show dielectric loss $\epsilon''(\omega)$, respectively.

次に、キャリア濃度が低い高抵抗 n型半導体シリコンウエハーの平行平板試料の透過スペクトルを Fig. 1-17 に示す。Figure 1-18 に透過スペクトルから算出した複素誘電率を示す。高抵抗シリコンの場合にはほぼ全領域で 100%近い透過率を示す。これはキャリアがほとんど存在せず、そのため電磁波は素通りしてゆく。プラズマ振動数も数 cm^{-1} 以下と推測される。実際に、抵抗値 $R = 10 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ からキャリア移動度を $1350 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ としてキャリア濃度を計算すると $N = 7.68 \times 10^{13} \text{ mol}/\text{cm}^3$ となる。プラズマ振動数は式 (4-5) に代入して $\omega_p = 0.4 \text{ cm}^{-1}$ (11.9 GHz) を得る。今回使用した THz-TDS は 2 cm^{-1} 以下の低振動数領域の S/N が悪いので判断は難しいが、この ω_p の値は測定結果と矛盾しない。

四端子法で得られた抵抗値と THz-TDS から求めた値が極めて良い一致を示していることから、逆に THz-TDS により非破壊・非接触でシリコン基板の抵抗値を測定できることが分かる。

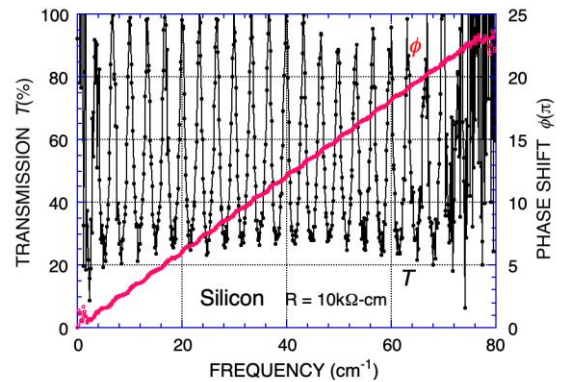


Fig. 1-17 Transmission $T(\omega)$ and phase shift $\phi(\omega)$ spectra of Si wafer with high resistance $R = 10 \text{ k}\Omega\text{-cm}$ measured by THz-TDS. Black circles show $T(\omega)$ and red ones show phase shift $\phi(\omega)$.

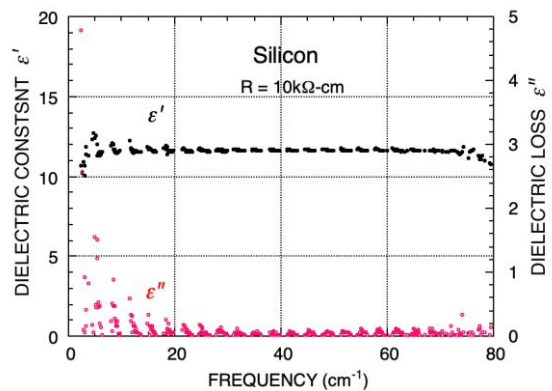


Fig. 1-18 Dielectric functions estimated by transmission intensity and phase shift of Fig. 1-17. Black legends show dielectric constant $\epsilon'(\omega)$ and red ones show dielectric loss $\epsilon''(\omega)$, respectively.

4.1.2 ボゾンピーク

ガラスなどの非晶質（アモルファス）と呼ばれる物質は結晶のような規則的な周期構造を持たないため、構成原子の集団運動である格子振動は存在しない。その代わりに、原子間の短距離秩序に起因する励起状態と考えられるボゾンピークと呼ばれる特異な誘電応答がちょうど THz 領域に観測される。この名称は、ラマン散乱スペクトルをボーズ・アインシュタイン因子で除算して得られる電気感受率の虚部

$\chi'' = \varepsilon''/\omega$ になだらかでブロードな極大となって現れることからボゾンピークと名付けられた^{14,17-23)}。

$$I(\omega) = I_0\{n(\omega) + 1\}\chi'' \quad (1-18)$$

$$1 + \chi = 1 + \chi' + i\chi'' = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\varepsilon' + i\varepsilon''}{\varepsilon_0} \quad (1-19)$$

この除算が必要ない中性子散乱スペクトルにも同様な極大が出現する。これまで、ラマン散乱、中性子散乱や赤外分光測定により多くの研究報告があるが、これらの測定において極大を示す振動数が一致しないこともあり、その起因は今だに明らかになっていない。ある周波数でピークを持つ過剰な振動状態密度が存在し、それがアモルファスの低温における比熱や熱伝導特性が結晶とは大きく異なる原因となっていることが指摘されていたが、その起源については解明されていない。

上述のように THz-TDS では赤外活性な励起状態の誘電率と誘電損失を同時に決定することが可能であるため、ボゾンピークの研究には有力である。ここでは、例として「弱いガラス」(weak glass) に分類されているアモルファスポリマーと「強いガラス」に分類される酸化物について議論する。最初に高分子化合物の PMMA (Polymethylmethacrylate) について照会する。ラマン散乱強度およびそれから導出された誘電損失のスペクトルを Fig. 1-19 に示す。振動数 80 cm⁻¹ にブロードな極大を持つボゾンピークに典型的な確認できる。Figure 1-20 に THz-TDS 透過測定により得られた誘電損失スペクトルを示す。こちらの図には比較のために、ラマン散乱によって得られた結果も挿入してある。THz-TDS の測定では、誘電損失 $\varepsilon''(\omega)$ は 75 cm⁻¹ を中心にブロードな極大が見られる。THz-TDS では高振動数側で急速に減少して行く傾向が見られるが、THz-TDS

では 80 cm⁻¹ 以上の高振動数領域では測定精度が下がるが誤差の範囲内で 75 cm⁻¹ あたりに近傍にピークが存在することは確かである。これらの測定結果から PMMA のボゾンピークの起源はラマン活性かつ赤外活性な励起状態（モード）であることが分かる。

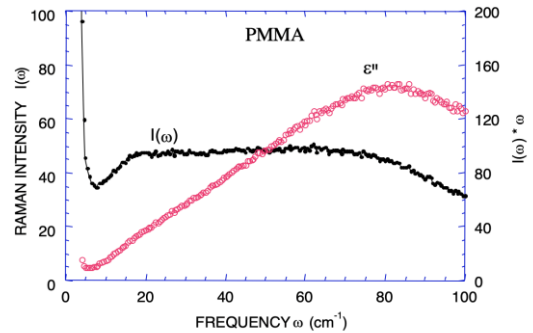


Fig. 1-19 Raman scattering intensity $I(\omega)$ and dielectric loss $\varepsilon''(\omega)$ of weak glass polymer PMMA, respectively^{14,21)}.

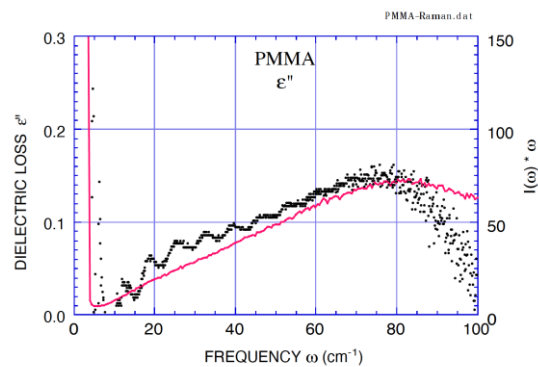


Fig. 1-20 Dielectric loss $\varepsilon''(\omega)$ of PMMA. Red curve shows that estimated from Raman scattering intensity $I(\omega)$ and black circles those measured by THz-TDS^{14,21)}.

同じく高分子化合物である Arton は ノルポネン構造を主鎖骨格とし、極性基を分子中に有する構造である。このことから、赤外活性モードを検出ことのできる THz-TDS の透過スペクトルに現れることが期待される。実際に、Arton の誘電損失スペクトルにおいても 50 cm⁻¹ 付近に極大をもつボゾンピークと思われるブロードなピークが見られる (Fig. 1-21 および Fig. 1-22)。同様な極性基を持つポリカーボネートでも 50 cm⁻¹ 付近に極大を示すボゾンピークが観測された。

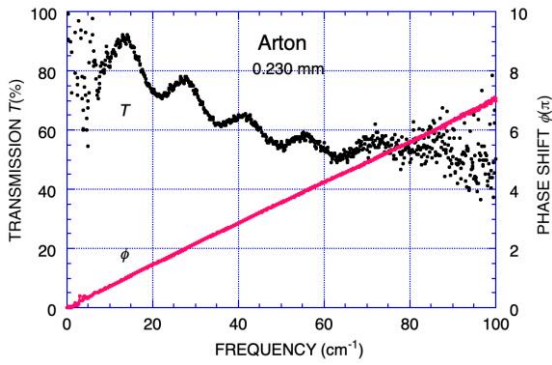


Fig. 1-21 Transmission $T(\omega)$ and phase shift $\phi(\omega)$ spectra of polymer Arton measured by THz-TDS. Black circles show $T(\omega)$ and red ones show phase shift $\phi(\omega)$ ¹⁴⁾.

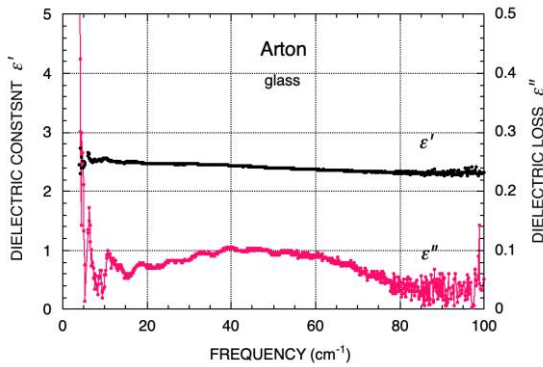


Fig. 1-22 Dielectric functions of Arton estimated by transmission intensity and phase shift of Fig. 1-21. Black circles show dielectric constant $\epsilon'(\omega)$ and red ones show dielectric loss $\epsilon''(\omega)$, respectively¹⁴⁾.

次に、「強いガラス」(Strong glass)に分類されているアモルファス酸化物について照会する。熔融石英(Fused Quartz)では 50 cm^{-1} 付近に極大をもつ $10\sim 100\text{ cm}^{-1}$ に広がるブロードなボゾンピークがラマン散乱等で観測されることが知られている。ここでは、アモルファス酸化物の一つである臭化酸リチウム($\text{Li}_2\text{B}_2\text{O}_4$)についての測定結果を紹介する。 $\text{Li}_2\text{B}_2\text{O}_4$ の透過スペクトルを Fig. 1-23, 誘電関数スペクトルを Fig. 1-24 に示す¹⁴⁾。誘電損失 $\epsilon''(\omega)$ においてボゾンピークと思われる 26 cm^{-1} 付近に極大をもつブロードなピークが明確に確認できる。この物質の場合は、ピークの幅が $10\sim 50\text{ cm}^{-1}$ と他のアモルファスに比べて比較的狭い。また、誘電率 $\epsilon'(\omega)$ にも異常がみられるが原因ははまだ解明されていない。

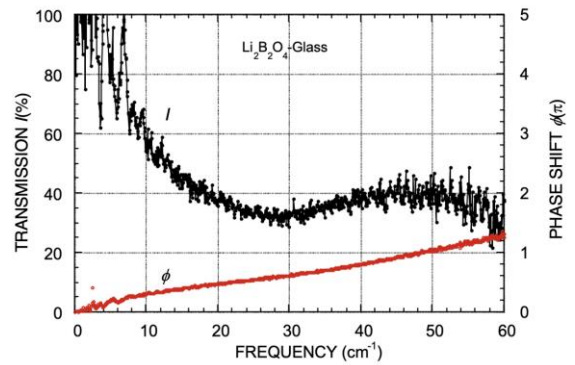


Fig. 1-23 Transmission $T(\omega)$ and phase shift $\phi(\omega)$ spectra of $\text{Li}_2\text{B}_2\text{O}_4$ measured by THz-TDS. Black circles show $T(\omega)$ and red ones show phase shift $\phi(\omega)$ ¹⁴⁾.

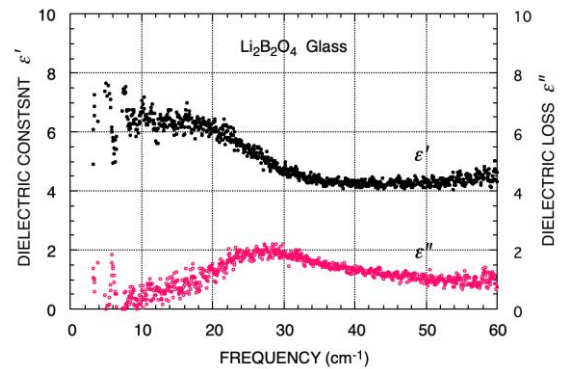


Fig. 1-24 Dielectric functions of $\text{Li}_2\text{B}_2\text{O}_4$ estimated by transmission intensity and phase shift of Fig. 1-24. Black circles show dielectric constant $\epsilon'(\omega)$ and red ones show dielectric loss $\epsilon''(\omega)$, respectively¹⁴⁾.

一昨年(2022年6月), 東大生研の田中らの研究グループは、アモルファスに分子動力学シミュレーションを適用し、ボゾンピークの起源が、「有限の長さの一次元的なひも状の粒子群の協同的な振動」に起因していることを報告した(Nature Physics)²⁵⁾。これまでは過剰な振動状態密度の起源は、アモルファス物質の硬さが空間的に不均一であることによるフォノンの擾乱(散乱)によるという説が有力と考えられていたが、この研究は従来の説とは異なり、新しいボゾンピークの発生機構を提案するものである。また、このような空間的にある程度の広がりを持った協同的な粒子の振動は、アモルファスの構造欠陥に由来したものと考えられてきた。今回の発見は、これとは全く別のこれまで知られていなかったタイプの準局在振動モードが存

在することを示した全く新しい概念であり、その発展が期待される。

アモルファスのボゾンピークは古くから知られているが、その起源についていまだ確立した解釈がなされていないように思われる。理論家にとっても実験家にとっても大変興味深いテーマであり、今後の研究の動向が注目される。

本稿の後半(その2)では、位相シフトスペクトルから直接算出できる誘電分散 $\omega(\mathbf{k})$ の測定例として「矩形導波管中の分散関係」・「フォトニック結晶におけるフォトニックバンドと局在モードの出現」・「強誘電体中のフォノン・ポラリトン分散関係」について測定例を中心に議論する。

謝 辞

本解説で紹介した研究成果の多くは、信州大学理学部の宮丸文章教授、(株)分光計測社長の西澤誠治博士、筑波大学の小島誠治名誉教授、福井大学の谷正彦教授、物材研の迫田和彰博士、Dayton 大学の J. W. Haus 教授、そして北大の故井上久遠名誉教授との共同研究によるものである。ここにお名前を記して心より感謝申し上げます。また、信州大学理学部に在職中に研究室で共に学んだ大学院生・学生の皆さんに御礼申し上げます。

参 考 文 献

1. C. Kittel: "Introduction to Solid State Physics (9th ed.)", Wiley, (2018).
2. 工藤恵栄, "光物性基礎"オーム社, (1996) .
3. 大成誠之助, "固体スペクトロスコピー", 裳華房, (1994) .
4. T. Kurosawa : Polarization Waves in Solid; J. Phys. Soc. Jpn., **16**, 1298 (1961).
5. D. H. Auston, K. P. Cheung, and P. R. Smith: Picosecond photoconducting Hertzian dipoles; Appl. Phys. Lett., **45**, 284 (1984).
6. Special review issue "Terahertz electromagnetic pulse generation, physics, and applications", J. Opt. Soc. Am., **B11**, 2454 (1994).
7. D. H. Auston, K. P. Cheung, J. A. Valdmanis, and D. A. Kleinman: New Materials for Photoconductive Terahertz Antennas; J. Opt. Soc. Am. B **13**, 2424-2436 (1996).
8. 阪井清美, 谷正彦, 斗内政吉, 松浦周二, 深澤亮一, 安部

- 元: 通信総合研究所季報, 637-650 (1997) .
9. M. Tani, S. Matsumoto, K. Sakai and S. Nakashima: Emission characteristics of photoconductive antennas based on low-temperature-grown GaAs and semi-insulating GaAs; Appl. Opt. **36**, 7853 (1997).
10. 大森豊明, "テラヘルツテクノロジー ~発生・計測・応用技術・展望~", エヌ・ティー・エス (2005) .
11. 西澤純一, "テラヘルツ波の基礎と応用", 工業調査会 (2005) .
12. 北原英明, "THz時間領域分光法によるフォトニックバンド構造の決定", 信州大学大学院工学系研究科 修士論文 (2001), および, 北原英明, "フォトニッククリスタルの電磁波特性解析と測定", 信州大学大学院工学系研究科博士論文(2004).
13. M. W. Takeda, Y. Noda and T. Yamaguchi: Inelastic Neutron Scattering Study of Ferroelectric Phase Transition in Lithium Heptagermanate ($\text{Li}_2\text{Ge}_7\text{O}_{15}$); Ferroelectrics, **412**, 45 (2011). その他下記の文献を参照されたい。M. Wada, A. Sawada, and Y. Ishibashi: Ferroelectricity and a Soft Mode in $\text{Li}_2\text{Ge}_7\text{O}_{15}$ Crystal; J. Phys. Soc. Jpn., **50**, 1881 (1981), M. Wada and Y. Ishibashi: Ferroelectric Phase Transition in $\text{Li}_2\text{Ge}_7\text{O}_{15}$; J. Phys. Soc. Jpn., **52**, 198 (1983), 小島誠治, 北原英明, 津村直希, 西澤誠二, 武田三男, "テラヘルツ時間領域分光と物性物理への応用", 固体物理, **38**, 2003 (2003).
14. 小島誠治, 北原英明, 津村直希, 西澤誠治, 武田三男, "テラヘルツ時間領域分光と物性物理学への応用-フォノン・ポラリトンとボゾンピーク", 固体物理 No. 5 Vol.38, (2003) .
15. 武田三男, 中田陽介, 千葉永, 宮丸文章, "H字型強誘電体導波管におけるEPSILON NEAR ZEROトンネリング現象の数値解析", 長野県南信工科短期大学校紀要, **7**, 2-6 (2023) .
16. 津村直希, "テラヘルツ時間領域分光法による強誘電体フォノン・ポラリトンの研究", 信州大学大学院工学系研究科 修士論文 2002年.
17. V. K. Malinovsky, and A. P. Sokolov: The nature of boson peak in Raman scattering in glasses; Solid State Commn. **57**, 757 (1986).
18. I. Pocsik and K. Koos: Cluster size determination in amorphous structures using the boson peak; Solid State Commn. **74**, 1253 (1990).
19. P. W. Anderson: Through the glass lightly; Science, **267**, 1615 (1995).
20. 中山恒義, シリカガラスのボゾン・ピークとその物理物理学会誌BUTURI, **58** [7], pp512-519519 (2003).
21. S. Kojima, M. W. Takeda, S. Nishizawa: Terahertz time domain spectroscopy of complex dielectric constants of boson peaks; Journal

- of Molecular Structure, **651**, 285-288, (2003).
22. 小島誠治: ガラス転移のダイナミクス リチウムホウ酸塩ガラス; 波紋, **16**[1], p.44 (2006).
23. H. Shintani and H. Tanaka: Universal link between the boson peak and transverse phonons in glass; Nature Materials, **7**, 870-877 (2008).
24. M. Kabeya, T. Mori, Y. Fujii, B. W. Lee, J. H. Ko, A. Koreeda & S. Kojima: Boson peak dynamics of glassy glucose studied by integrated terahertz-band spectroscopy; Phys. Rev. B **94**, 224204/1-9 (2016).
25. Y.-C. Hu and H. Tanaka: Origin of the boson peak in amorphous solids; Nature Physics, **18**, 669-677(2022).
26. 平田仁, “マイクロ波工学の基礎”, オーム社, (2022年) .
27. 新井宏之, 木村雄一, “電磁波工学 (伝播工学基礎シリーズ1)”, 朝倉書店 (2018) .
28. David M. Pozar (著), 永妻忠夫, 村田博司, 真田篤志 (共訳), “マイクロ波工学”, 森北出版 (2021) .
29. K. Ohtaka: Energy band of photons and low-energy photon diffraction; Phys. Rev. **B19**, 5057 (1979).
30. E. Yablonovitch: Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics; Phys. Rev. Lett. **58**, 2059 (1987).
31. S. John: Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices; Phys. Rev. Lett. **58**, 2486 (1987).
32. J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, J. N. Win, R. D. Meade, “Photonic Crystals, Molding the Flow of Light –”, Princeton University (2008).
33. K. SAKODA, “Optical Properties of Photonic Crystals”, 2nd Edition., Springer, (2013) .
34. K. Sakoda, “Photonic Crystal and Plasmonic Microcavities. MICRO- AND NANOPHOTONIC TECHNOLOGIES”, Wiley, (2017).
35. 井上久遠, 迫田和彰, 和田 (武田) 三男, “二次元フォトン結晶と輻射場の制御”, 固体物理, **30**(2), 131-139, 1995年.
36. 北原英明, 谷正彦, 武田三男, “テラヘルツ時間領域分光とフォトン結晶への応用”, 固体物理, **36**, 391-401, 2001年.
37. 武田三男, “テラヘルツ波制御用 3次元フォトン結晶の創製と応用”, マテリアルインテグレーション, **14**, 15-20, 2001年.
38. M. W. Takeda, Kazuaki Sakoda, and Kuon Inoue: Far-Infrared Spectroscopy Study of an Uncoupled Mode in a Two-Dimensional Photonic Lattice; Phys. Rev. B, **52**(23), 16297-16300, (1995).
39. K Inoue, M. Wada, K. Sakoda, M. Hayashi, T. Fukushima, and A. Yamanaka : Near-Infrared Photonic band Gap of Two-Dimensional Triangular Air-Rod Lattices as Revealed by Transmittance measurement ; Phys. Rev. B, **53**(3), 1010-1013, (1996).
40. M. Wada, Y. Doi, K. Inoue, J. W. Haus, and Z. Yuan: A Simple-Cubic Photonic Lattice in Silicon; Appl. Phys. Lett., **70**, 2966 (1997).
41. M. Wada (Takeda), Y. Doi, K. Inoue, and J. W. Haus: Far-Infrared Transmittance and Band Structure Correspondence in Two-Dimensional Air-Rod Photonic Crystals; Phys. Rev. B, **55**(16), 10443-10450 (1997).
42. T. Aoki, M. W. Takeda, J. W. Haus, Z. Y. Yuan, M. Tani, K. Sakai, N. Kawai, K. Inoue: Terahertz Time-Domain Study of a Pseudo-Simple Cubic Photonic Lattice; Phys. Rev. B., **64**(4), 045106, (2001).
43. H. Kitahara, N. Tsumura, H. Kondo, M. Wada Takeda, J. W. Haus, Zhenyu Yuan, N. Kawai, K. Sakoda and K. Inoue: Terahertz Wave Dispersion in Two-Dimensional Photonic Crystals; Phys. Rev. B., **64**(4), 045202 (2001).
44. N. Kawai, M. Wada (Takeda), and K. Sakoda: A Numerical Calculation of Defect Modes: Pseudo-Triangular Lattice with Square Rods; Jpn. J. Appl. Phys., **37**(8), 4644-4647 (1998).
45. 近藤裕考 「フォトン結晶における不純物局在モードの理論計算」, 信州大学大学院工学系研究科 修士論文 2002年.
46. S. Kojima, N. Tsumura, H. Kitahara, M. Wada Takeda, and S. Nishizawa : Terahertz Time Domain Spectroscopy of Phonon-Polariton in Ferroelectric Lithium Niobate Crystals; Jpn. Appl. Phys., **41**(11B), 7033-7037, (2002).
47. S. Kojima, N. Tsumura, M. Wada Takeda, and S. Nishizawa : Terahertz Dielectric Spectroscopy of Phonon-Polariton in Several Ferroelectrics; Ferroelectrics, **272**, 99-104, (2002).
48. S. Nishizawa, N. Tsumura, H. Kitahara, M. Wada Takeda, and S. Kojima : New Application of Terahertz Time-Domain Spectrometry (THz-TDS) to the Phonon-Polariton Observation on Ferroelectric Crystals; Phys. Med. Biol., **47**(21), 3771-3776, (2002).
49. S. Kojima, N. Tsumura, M. W. Takeda, S. Nishizawa : Terahertz time domain spectroscopy of phonon-polariton in ferroelectric bismuth titanate ; Ferroelectrics, **272**, 2091-2096, (2002).
50. S. Kojima and S. Shimada: Soft Mode Spectroscopy of Bismuth Titanate Single Crystals; Physica, **B219&220**, 617 (1996).
51. S. Kojima, N. Tsumura, M. W. Takeda, and S. Nishizawa: Far-Infrared Phonon-Polariton Dispersion Probed by Terahertz Time-Domain Spectroscopy; Phys. Rev. B, **67**, 035102 (2003).

【技術資料】

大芝湖における多重衝突形水車によるマイクロ水力発電実験

栗田秀實*・倉澤勝美**・宮島 俊***・武田三男***

Micro Hydro Power Generation Experiment Using Multiple Impact Water Turbine in Lake Oshiba

Hidemi KURITA, Katsumi KURASAWA, Shun MIYAJIMA, Mitsuo W. TAKEDA

1. まえがき

地球温暖化を防止し、化石燃料をできるだけ未来の世に残していくためのひとつの手段として身近な自然エネルギーの利用の拡大が求められつつある近年の状況の中で、著者（栗田）は、手軽に設置できて高効率なマイクロ風車・水車の開発研究に2004年から携わり、従来とは異なる新しい考え方により効率の向上を図る多重衝突形風車・水車を創案した^{1)・2)}。この新方式の風車・水車について日本、米国、ドイツの特許を取得し^{3)~9)}、試作機による室内発電実験や現地での発電実験を実施し、性能の確認や試作機の改良を行ってきた。

マイクロ水力発電装置については、これまでの試作機による実験により、実用化、商品化が可能な段階になったため、農業用水路や小河川等に簡単に設置できる小型、高効率な商品化原型機として100W級水車を2020年に製作し、室内実験により100W級水車が従来型水車より高い発電効率を有することを確認した。

2023年に南箕輪村大芝高原大芝湖において南信工科短期大学と共同で100W級水車による発電実験を行い、100W級水車が水車流量1l/s以下の微小水力においても高い水車発電機効率を有することが現地実験においても確認され、また、大芝湖からの流出水を利用したマイクロ水力発電の可能性についても検討したの

でその結果を報告する。なお、本実験において、実験に使用した水車の開発・製作、発電実験の計画、機材の準備、実験データの解析、報告資料・論文の作成等は栗田が、南箕輪村への実験の許可申請は宮島が行い、実験場所の事前調査及び発電実験は栗田、武田、宮島、倉澤が共同して行った。

2. 多重衝突形水車

2.1 多重衝突による効率の向上

ペルトン水車、フランシス水車、プロペラ水車などの従来型の水車の場合には、水車に流入した水流が羽根に作用したときに、水流から個々の羽根に伝達される力が最大になるように羽根の形状を改良することにより水車のエネルギー変換効率の向上が図られている。

これに対し、多重衝突形水車の場合には、図1に示すように、水車に流入した水流が最初の羽根に衝突して羽根に力を与えた後、その羽根から流出した水流が下流側の次の羽根に作用し、その羽根に力を与えた後、さらにその下流側の羽根に作用するという過程を繰り返すように羽根が配置されている^{1)~9)}。このような羽根の配置により、水車に流入した水流は、水車から流出するまでの間に複数回にわたり次々と下流側の羽根と衝突し、その都度、水車に多重的に回転力を与え、その結果として水車のエネルギー変換効率が向上する。

*自然調和技術研究所

380-0946 長野市平柴台 146

Harmony with Nature Technology Laboratory,
146 Hirasibadai, Nagano, 380-0946 Japan

**長野県南信工科短期大学 電気システム学科,
南箕輪村,

Department of Electrical Systems Engineering,
Nagano Prefecture Nanshin Institute of Technology,
8304-190 Minamiminowa, Nagano, 399-4511 Japan

***長野県南信工科短期大学 南箕輪村

Nagano Prefecture Nanshin Institute of Technology,
8304-190 Minamiminowa, Nagano, 399-4511 Japan



図1 多重衝突形水車の効率向上の考え方

2. 2 100W 級水車の概要

本実験で用いた 100 W 級水車は、発電出力 100 W として設計・製作されたもので、発電電力は三相交流電流として出力される。その概要を図 2 に示す。

2. 3 多重衝突形水車と従来型水車の効率の比較

これまでにを行った多重衝突形水車による発電実験としては、100W 級水車を用いて行ったものとして研究室における室内発電実験、阿南町新野の U 字溝水路で行った発電実験及び今回の大芝湖における発電実験があり、その他に従来型のクロスフロー水車の羽根車を多重衝突形羽根車に付け替えて実験をした飯田市千代の野池親水公園における山間の渓流水を利用した発電実験がある。これらの実験によって得られた多重衝突形水車の水車発電機総合効率を、従来型の水車と比較して図 3 に示す。図 3 の横軸は発電出力で、縦軸は水

車発電機総合効率である。図 3 に示されているデータのうちで、青い◆が多重衝突形水車の実験結果で、緑の□が既設水車の発電事例^{10)~17)}、赤い○が市販されている水車のカタログ値で、国内のデータのほかに一部海外のデータも含まれている。また、紫の●が野池小水力発電において当初に取り付けられていた従来型のクロスフロー水車の場合の実験結果である。図からわかるように、全般的に発電出力が小さい場合には水車発電機総合効率が低くなる傾向がみられ、特に、発電出力 100W 以下の場合には従来型水車の水車発電機総合効率は著しく低下している。これに対し、多重衝突水車の水車発電機総合効率は発電実験を行った発電出力 8~230W の範囲において、従来型水車に比べ格段に高く、発電出力 8W においても 54% 程度の高い効率を有している。

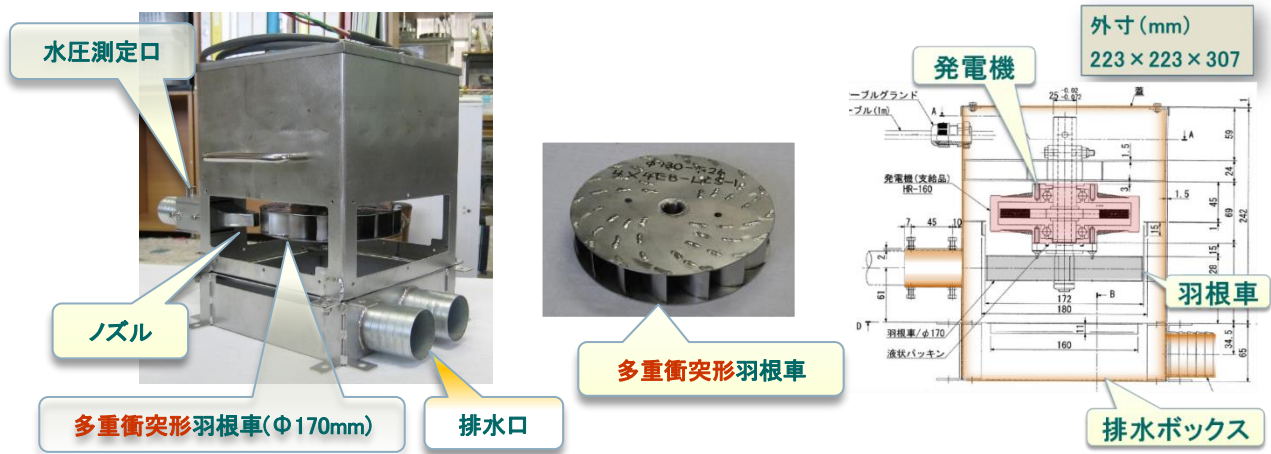


図 2 100W 級水車の概要

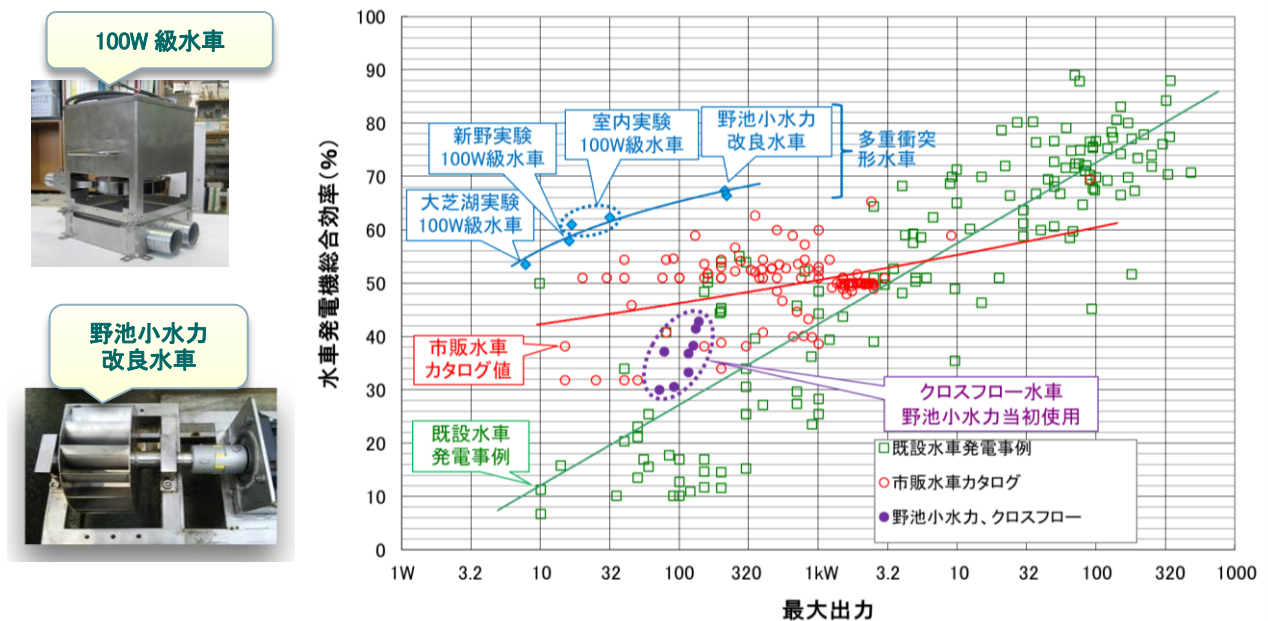


図 3 多重衝突形水車と従来型水車の水車発電機総合効率の比較

3. 実験場所・実験期日

今回、マイクロ水力発電実験を行った南箕輪村大芝高原の大芝湖の状況を図 4(a)~(d)に示す。大芝湖は上の池と下の池からなり、上の池の流出水は流出部出口の高さ 3 m の落差工を落下し、連絡水路を経由して下の池に流入している。今回の実験を行った時期は渇水期にあたり、上の池の水位が低かったため、流出口からの水の流出はなかった。

発電実験は 2023 年 11 月 5 日に実施し、9 時~14 時に実験機材の設置、発電実験(発電出力・有効落差・水車流量の測定等)、実験機材の撤収を行った。また、事前の現地調査を 2022 年、2023 年に行った。

4. 水力発電装置の設置

4. 1 水車

(1) 設置方法

図 4(d)に示すように、上の池流出口の下部にある連絡水路の南側の平地に水車を設置した。上の池流出口から水車までの水平距離は約 9 m、上の池の水面と水車のノズル中心線の位置の高度差は 2.8 m であった。

(2) 設置機器

・100W 級マイクロ水車 1 号機 (縦軸設置)

羽根車 $\phi 170$ -F26-4 \times 4EB-LCS-1

発電機 SKY-HR 160Y (32 極)

ノズル $\phi 38 \times 8 \times 14$ -R21-0/R66-30 (口径 8 \times 14 mm)

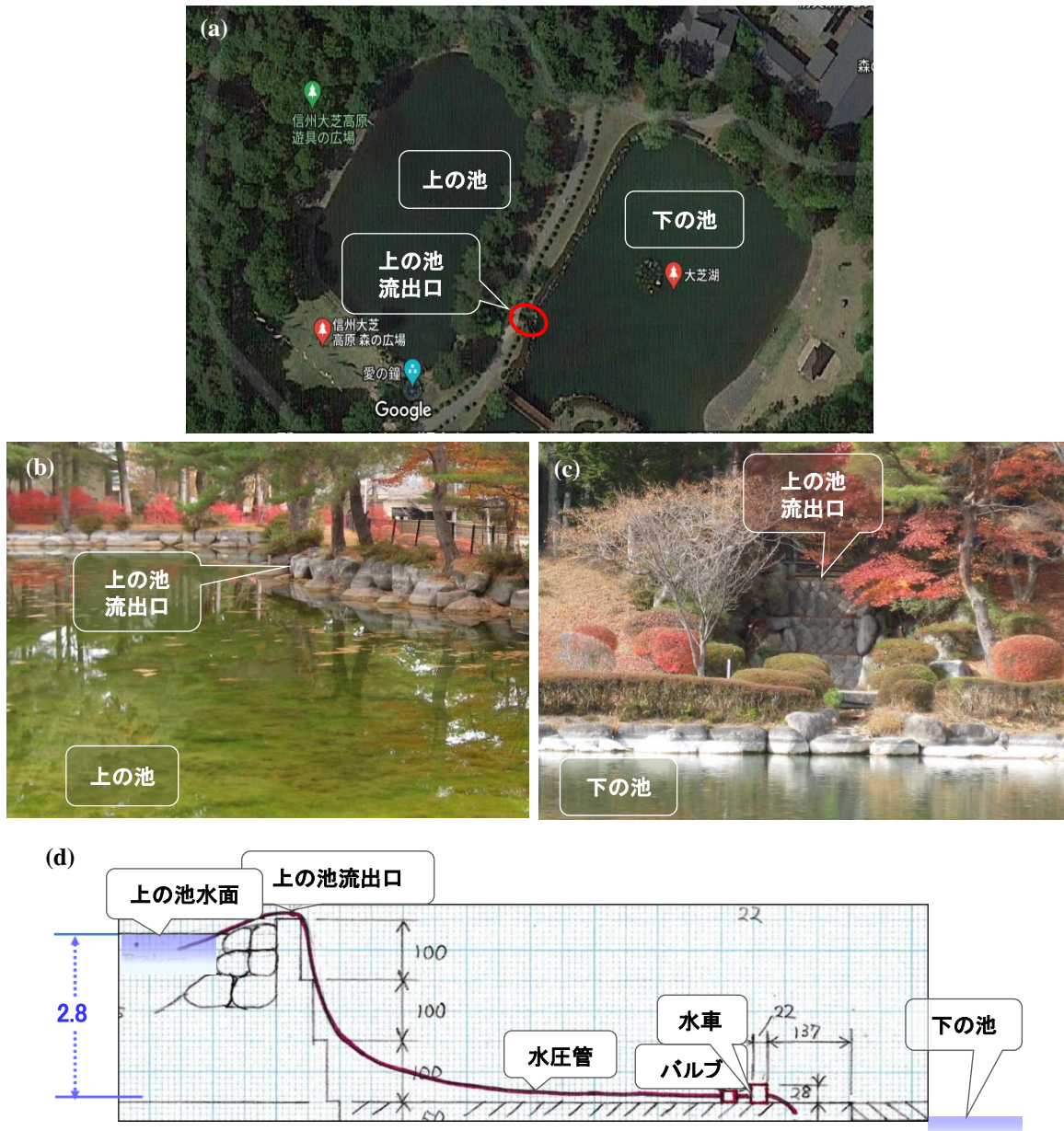


図 4 大芝湖マイクロ水力発電の実験場所及び水車・水圧管の設置状況

4. 2 水圧管・バルブ・放流管

(1) 設置方法

水車・水圧管等の設置状況を図 5 に示す。前述のように、今回の実験時には上の池の水位が低く、流出口から水の流出がなかったため、サイフォンにより上の池の水を汲み出し、上の池の堰堤の下に設置した水車まで送水した。水車への送水を制御するため、取水口、サイフォン部、水車入口の 3 か所にボールバルブを取り付けた。水車放流水は流出口下部の連絡水路に排出した。水圧管の全長（バルブ、接手は除く）は 12.0 m であった。

(2) 設置機材

- ・水圧管 トヨロンホース 内径 $\phi 50$ 、長さ 1.9 m
透明ビニールホース 内径 $\phi 38$ 、長さ 9.1 m
パワーホース 内径 $\phi 38$ 、長さ 1.0 m
- ・放流管 排水ホース 内径 $\phi 50$ (2 本並列)
- ・バルブ 取水口 PVC コンパクトボールバルブ
呼び径(A) 32, ボア径 $\phi 30$
サイフォン PVC コンパクトボールバルブ
呼び径(A) 20, ボア径 $\phi 20$
水車入口 ボールバルブ フルボア黄銅製
600 型 呼び径(A) 40, ボア径 $\phi 38$



図 5 水車・水圧管等の設置状況

5. 測定方法・測定機器等

5.1 有効落差の測定

(1) 測定方法

ノズル入口に取り付けられている水圧測定口と水車近傍の机の上に設置した 0.6 級圧力計をビニールホースで接続し、ノズル入口の静水圧を測定し (図 6(a), (b), (c)), ノズル入口の静水圧から(1)式により有効落差を計算した^{18), 19)}。式中の水圧測定位置断面における流速 v_1 は水車流量 Q と水圧測定位置の断面積 A_1 から(2)式により計算した。

$$H = p_1 / \rho g + v_1^2 / 2g + (z_2 - z_1) \quad (1)$$

$$v_1 = Q / A_1 \quad (2)$$

ここで、 H : 有効落差 (m), p_1 : 水圧測定位置の静水圧 (Pa), v_1 : 水圧測定位置断面における流速 (m/s), z_1 : ノズル中心線の基準位置からの高さ (m), z_2 : 圧力計の基準位置からの高さ (m), ρ : 水の密度 (kg/m^3),

g : 重力の加速度 (m/s^2), Q : 水車流量 (m^3/s), A_1 : 水圧測定位置のノズル断面積 (m^2)である。

(2) 測定機器

・長野計器 0.6 級圧力計 GA16

5.2 水車流量の測定

(1) 測定方法

水車からの放流水をプラスチック製採取容器 (空重量 0.46 kg) に採取し、秤で測定した採取水の重量と採取時間から下式により水車流量 Q を計算した (図 6(d), (e))。

$$Q = w / \rho t \quad (3)$$

ここで、 Q : 水車流量 (m^3/s), w : 採取水の重量 (kg), t : 採取時間 (s), ρ : 水の密度 (kg/m^3)である。

(2) 測定機器

・ヤマト デジタル式上皿自動はかり USD-1VD

・ストップウォッチ Drettec SW-111



図 6 有効落差・水車流量の測定

(a) ノズル入口の水圧測定口に接続された水圧測定ホース, (b) 圧力計の設置状況, (c) 圧力計に表示されたノズル入口圧力 0.013 MPa, (d) 水車放流水の採取 (同様の測定を行った阿南町新野の水路における発電実験時の状況, 2024 年 5 月), (e) 採取容器に採取された水車放流水の重量測定 (同様の測定を行った室内実験時の状況, 2021 年 11 月)

5. 3 発電出力の測定

(1) 測定方法

発電出力等の測定装置を図7に示す。発電機から出力された三相交流電流をダイオード整流器で直流電流に変換し、負荷抵抗に接続した。負荷抵抗には、すべり抵抗器とセメント抵抗器を直列接続したものをを用い、抵抗値を $50\ \Omega$ から $9\ \text{k}\Omega$ まで変化させ、負荷抵抗の変化に伴う発電出力の変化を測定した。整流後の直流電流の電圧、電流、電力をパワーメーターで測定（RMSモード）し、整流前の三相交流発電出力の赤黒線間の電圧・周波数をデジタルマルチメーターにより測定した。

(2) 実験機材・測定機器

- ・整流器 スカイ電子 S15VT60（整流器効率0.944）
- ・負荷抵抗 島津理化器械 すべり抵抗器 RE-T1
（0.75, 1.5, 3 $\text{k}\Omega$ ）
セメント抵抗器（1 $\text{k}\Omega$, 10 W）7個直列
- ・横河デジタルパワーメーター T210
- ・三和電気計器デジタルマルチメーター CD800a-P

5. 4 LED 防犯灯の点灯実験

(1) 測定方法

発電機から出力された三相交流電流の各線間に、2個ずつ直列接続した3組のLED防犯灯（計6個）を接続し、点灯状況を目視で確認した。

(2) 実験機材

- LED防犯灯 東芝 LEDK-78928NP-LS1 6.6 W
（2個ずつ直列接続、計6個）

6. 実験結果

6. 1 有効落差

前記方法による発電出力測定時におけるノズル入口の静水圧 p_1 の測定結果及びノズルや圧力計の基準位置からの高さ等は以下のとおりであった。

- ・水圧測定口位置の静水圧 $p_1 = 0.013\ \text{MPa} = 13000\ \text{Pa}$
- ・ノズル中心線の基準位置からの高さ $z_1 = 0.094\ \text{m}$
- ・圧力計の基準位置からの高さ $z_2 = 0.921\ \text{m}$
- ・水車流量（後出 6.2） $Q = 0.681\ \text{l/s} = 0.000681\ \text{m}^3/\text{s}$
- ・水圧測定口取付位置のノズル断面積 $A_1 = 0.000957\ \text{m}^2$

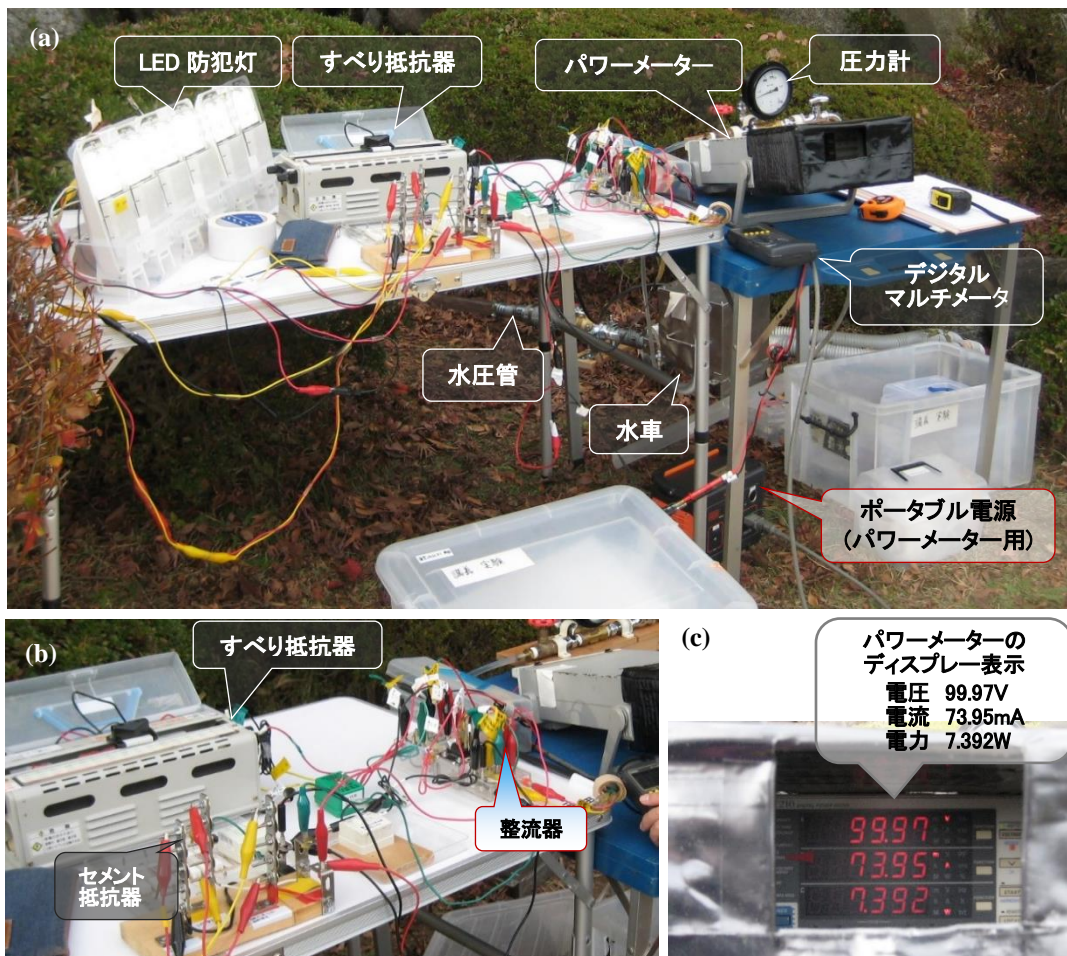


図7 発電出力の測定及びLED防犯灯の点灯実験

(a) 発電出力測定機器の配置状況, (b) 整流器と負荷抵抗の配置状況, (c) パワーメーターのディスプレイ画面表示

また、水圧測定口の断面における流速 v_1 を、水車流量 Q と測定口位置のノズル断面積 A_1 から (2) 式により計算した結果は、 $v_1 = 0.712 \text{ m/s}$ であった。

これらの値を (1) 式に代入し、水の密度 ρ を 1000 kg/m^3 、重力の加速度 g を 9.8 m/s^2 として計算を行った結果、有効落差 H は 2.19 m となった。

6. 2 水車流量

前記 5. 2 の方法で 6 回の測定を行い、水の密度 ρ を 1000 kg/m^3 として、採取水の重量と採取時間から (3) 式により水車流量 Q を計算した。

6 回の測定の平均値は、採取時間が 6.86 s 、採取水の重量が 4.67 kg 、水車流量 Q が $0.681 \text{ l/s} = 0.000681 \text{ m}^3/\text{s}$ であった。

6. 3 発電出力

負荷抵抗を変化させて整流後の直流発電出力を測定した結果を図 8～図 10 に示す。なお、抵抗器に表示された抵抗値は直流電圧と直流電流の測定値から計算した値（負荷抵抗計算値）との違いが大きかったため、以下では負荷抵抗計算値を負荷抵抗値として用いた。

図 8(a)に示すように直流発電出力は負荷抵抗値が 1344Ω の時に最大となり、 7.38W であった。負荷抵抗値が最大発電出力時の抵抗値より大きい場合には、抵抗値の増加にともなって発電出力が緩やかに減少した。

図 8(b), (c)に示すように、出力電圧は負荷抵抗値が大きくなるにしたがって高くなり、最大発電出力時には 99.6 V であった。また、出力電流は負荷抵抗値が大きくなるにしたがって減少し、最大発電出力時には 0.0741 A であった。

発電出力最大時におけるパワーメーター及びデジタルマルチメーターの測定値を表 1 に示す。三相交流発電出力は整流器効率を 0.944 (2017 年の発電実験時に測定) として直流発電出力から計算した。

図 9 に示すように、整流後の直流電流は電圧の増加にともなってほぼ直線的に減少したが、発電出力が最

表 1 パワーメーター及びデジタルマルチメーターの測定値 (発電出力最大時)

*1 測定値から計算 (直流電圧/直流電流)
*2 測定値から計算 (直流発電電力/0.944)

測定項目	測定値
負荷抵抗計算値 (Ω) *1	1344
直流電圧 (V)	99.6
直流電流 (A)	0.0741
直流発電出力 (W)	7.38
三相交流発電出力 (W) *2	7.82
交流周波数 (Hz)	92.4
三相交流線間電圧 (赤黒) (V)	74.4

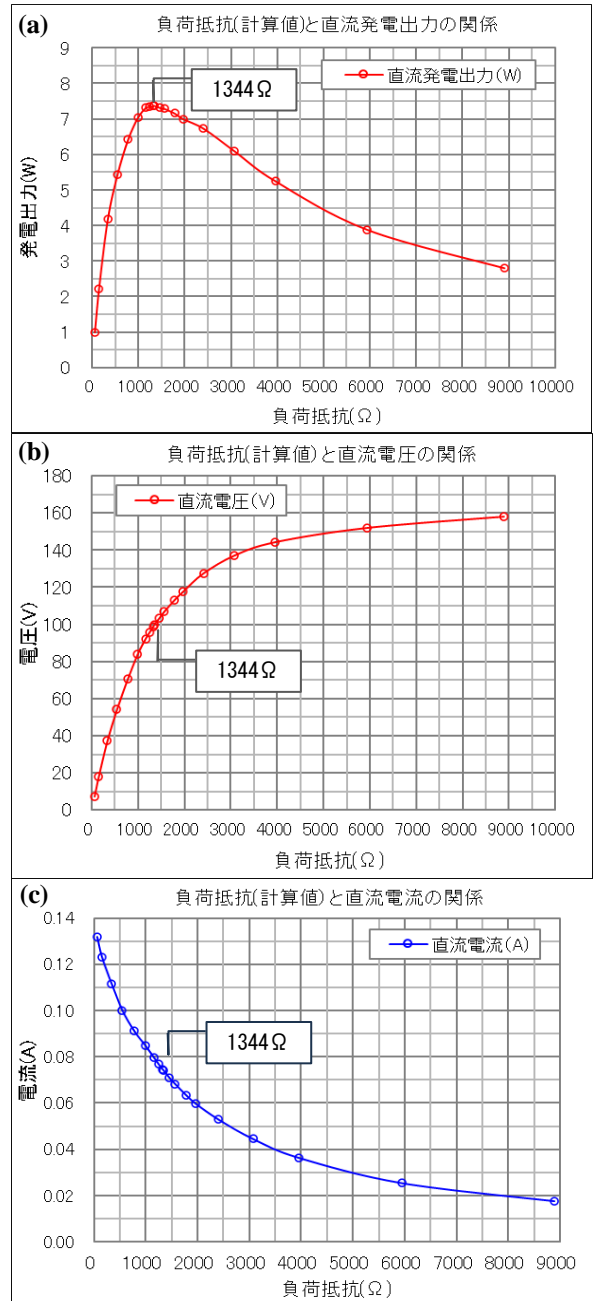


図 8 負荷抵抗と直流発電出力の関係結果

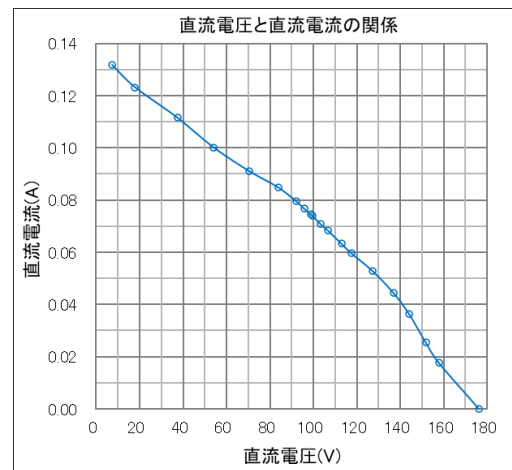


図 9 直流発電出力の電圧と電流の関係

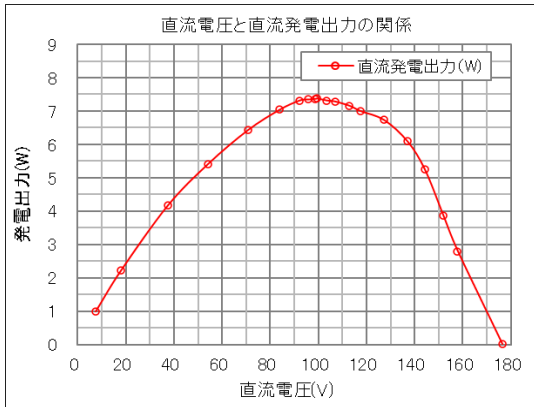


図 10 直流発電電圧と直流発電出力の関係

大となる 100 V 付近の電圧（図 10 参照）を中心としてその前後において少し上に凸の曲線になっている。

6. 4 LED 防犯灯点灯実験

三相交流発電出力の各線間に 2 個ずつ直列接続した 3 組の LED 防犯灯（計 6 個）が、交流発電出力が 7.8W の時に明瞭に点灯することを目視で確認した（図 11(b)）。このときの三相交流の線間電圧は表 1 に示したように 74.4V であったので、LED 防犯灯 1 個当たりの付加電圧は 37V で、定格電圧より大幅に低い値であった。

6. 5 理論水力・水車発電機総合効率等の計算

(a) 理論水力

理論水力（水車入力） P_h は次式により表わされる¹⁸⁾。

$$P_h = \rho g H Q / 1000 \quad (4)$$

ここで、 P_h ：理論水力 (kW)、 H ：有効落差 (m)、 Q ：水車流量 (m^3/s)、 ρ ：水の密度 (kg/m^3)、 g ：重力の加速度 (m/s^2) である。6.1、6.2 で求めた有効落差 2.19 m、水車流量 $0.000681 \text{m}^3/\text{s}$ を(4)式に代入し、水の密度 ρ を $1000 \text{kg}/\text{m}^3$ 、重力の加速度 g を $9.8 \text{m}/\text{s}^2$ として計算を行った結果、理論水力 P_h は 0.01461 kW (14.61 W) となった。

(b) 水車発電機の総合効率

水車発電機の総合効率（合成効率） η は、水力発電装置への入力である理論水力 P_h と、出力である発電出力 P_o から次式により計算される^{19), 20)}。

$$\eta = P_o / P_h \quad (5)$$

$$\eta = \eta_t \eta_g, \quad \eta_t = P / P_h, \quad \eta_g = P_o / P \quad (6)$$

ここで、 P_o ：発電出力 (kW)、 P_h ：理論水力 (kW)、 P ：水車出力 (kW)、 η ：水車発電機総合効率、 η_t ：水車効率、 η_g ：発電機効率である。上記(a)により求めた理論水力 0.01461 kW 及び 6.3 で求めた交流発電出力 0.00782 kW を(5)式に代入して計算を行った結果、水車発電機総合効率 η は 53.5% となった。

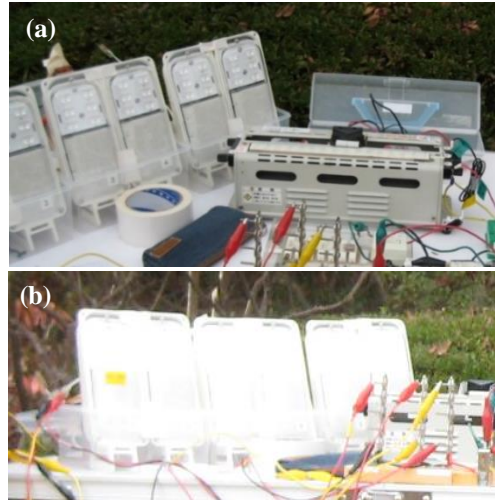


図 11 発電出力による LED 防犯灯の点灯実験

(a) 非点灯時の LED 防犯灯（東芝 LEDK 定格消費電力 6.6 W）、(b) 発電出力による LED 防犯灯の点灯状況。

(c) 水車の回転速度

交流発電機が同期状態にある場合には、出力電流の周波数と回転速度及び発電機の極数との間には次式の関係がある¹⁹⁾。

$$n = 120f / p \quad (7)$$

ここで、 n ：回転速度 (rpm)、 f ：交流周波数 (Hz)、 p ：発電機の極数である。本実験で使用した 100W 級水車の発電機の極数は 32 極であるので、(7)式は

$$n = 3.75f \quad (8)$$

$$f = 0.2667n$$

となる。下記(d)の周速比の計算では、デジタルマルチメーターにより測定した三相交流の周波数から(8)式により求めた回転速度を使用した。

(d) 水車の羽根先端周速比・ピッチ円周速比

水車の羽根先端周速比 λ は、水車の羽根先端の周速度 u とノズル噴出水の速度 v の比として次式により表わされる¹⁸⁾。

$$\lambda = u / v \quad (9)$$

$$u = \pi D (n / 60) \quad (10)$$

ここで、 λ ：羽根先端周速比、 u ：羽根先端の周速度 (m/s)、 v ：ノズル噴出水の速度 (m/s)、 D ：羽根車直径 (m)、 n ：回転速度 (rpm) である。ノズル噴出水の速度 v は、下式に水車流量 Q ： $0.000681 \text{m}^3/\text{s}$ とノズルの出口断面積 A ： $0.0008 \times 0.0014 \text{ m}^2 = 0.00112 \text{ m}^2$ を代入して計算した。

$$v = Q / A \quad (11)$$

また、ノズル噴出水の中心線に接する円（ピッチ円）の位置における羽根の周速度 u_{pc} ^{18), 20)} とノズル噴出水

の速度 v の比をピッチ円周速比 λ_{pc} とし、次式により計算した。

$$\lambda_{pc} = u_{pc} / v = u D_{pc} / D v = \lambda D_{pc} / D \quad (12)$$

ここで、 λ_{pc} : ピッチ円周速比、 λ : 羽根先端周速比、 u_{pc} : ピッチ円周速度(m/s)、 u : 羽根先端の周速度(m/s)、 v : ノズル噴出水の速度(m/s)、 D_{pc} : ピッチ円直径 (m)、 D : 羽根車直径 (m)である。なお、ピッチ円直径 D_{pc} は下式により計算した。

$$D_{pc} = \{(D/2) \times \cos(2\pi / (\text{羽根枚数} \times 2)) - (\text{羽根の厚さ} + \text{噴出流半径増加分}) + \text{水車径方向ノズル径} / 2\} \times 2 \quad (13)$$

今回の実験で用いた 100W 級水車の場合について、羽根車直径 D : 0.17m, 羽根車の羽根枚数 : 16, 羽根の厚さ : 0.001m, ノズル噴出から羽根に衝突するまでの間におけるノズル噴出流の半径増加分 : 0.001 mm, 水車の径方向のノズルの口径 : 0.008mm を代入して計算した結果、 $D_{pc} = 0.1547$ m, $D_{pc} / D = 0.9102$ となった。

上記の (7) ~ (13) 式を用いて水車の回転速度、周速比を計算した結果を、最大発電出力時及び無負荷抵抗時について表 2 に示す。また、(7) 式により三相交流発電電流の周波数から計算した水車の回転速度と直流発電

表 2 回転速度・周速比・ピッチ円周速比等の計算結果 (発電出力最大時)

項目	測定値
ノズル噴出水の速度 v (m/s)	6.08
水車の回転速度 n (rpm)	347
羽根先端の周速度 u (m/s)	3.08
羽根先端周速比 λ	0.507
ピッチ円周速比 λ_{pc}	0.462

(無負荷抵抗時)

水車の回転速度 n (rpm)	590
羽根先端の周速度 u (m/s)	5.25
羽根先端周速比 λ	0.864
ピッチ円周速比 λ_{pc}	0.786

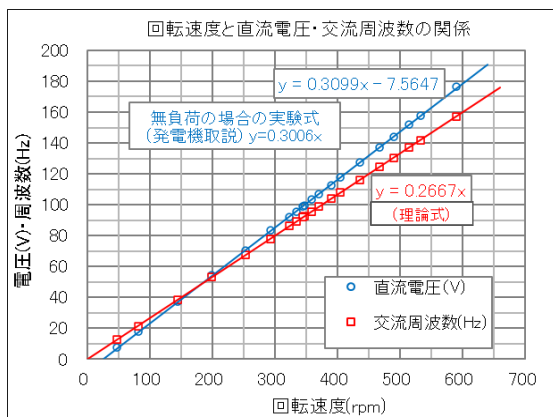


図 12 水車の回転速度と直流発電電圧・交流周波数の関係

電圧の関係を図 12 に示す。水車の回転速度が 24rpm 以下の場合には出力電圧が 0 V であったが、回転速度が 24rpm 以上の場合には回転に比例して直線的に出力電圧が増加することが確認された。

水車の回転速度と発電出力・水車出力の関係を図 13(a)に示す。水車出力 P は、発電機効率 η_g を 75% (長野工業高等専門学校電気電子工学科大澤教授に測定を依頼したデータから外挿した値) として(6)式により計算した。水車の回転速度は、無負荷抵抗時の 590 rpm (表 2 参照) に対し、発電出力最大時には 347rpm であり無負荷抵抗時に対する比率が 0.59 であった。

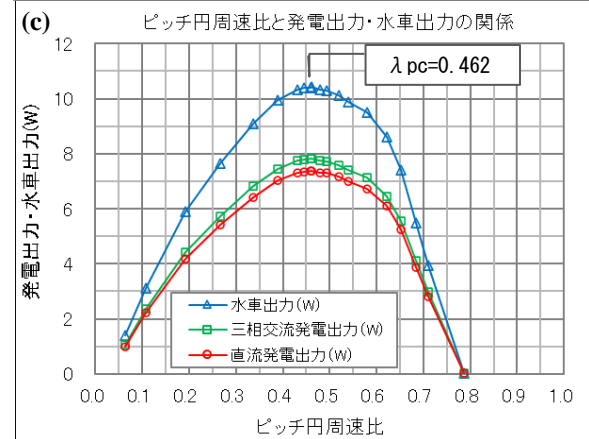
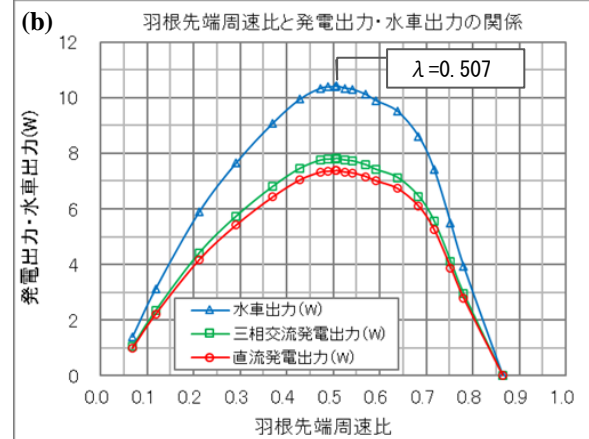
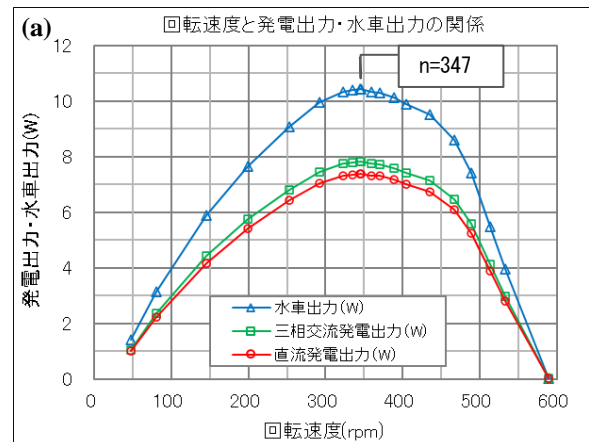


図 13 水車の回転速度・周速比と発電出力・水車出力の関係

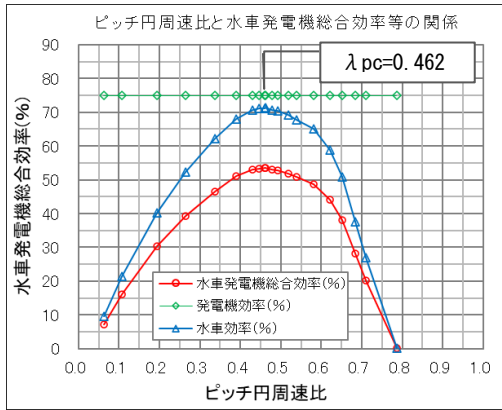


図 14 ピッチ円周速比と水車発電機総合効率の関係

水車の羽根先端周速比と発電出力の関係を図 13(b)に示す。羽根先端周速比は、無負荷抵抗時の 0.864 に対し、発電出力最大時には 0.507 であった。

水車のピッチ円周速比と発電出力の関係を図 13(c)に示す。ピッチ円周速比は、無負荷抵抗時の 0.786 に対し、発電出力最大時には 0.462 であった。

水車のピッチ円周速比と水車発電機総合効率の関係を図 14 に示す。水車発電機総合効率 η の最高値はピッチ円周速比 λ_{pc} が 0.462 の時の 53.5% であった。今回の実験で用いた多重衝突形水車と同じ衝動形水車に属するペルトン水車の場合について、千葉²⁰⁾は、理論的にはピッチ円周速比が 0.5 のときに最大効率になるが、実際の水車においては種々の条件が入るため 0.42~0.48 の時に最大効率になると述べているが、今回の実験結果はこれと符合していた。

水車発電機総合効率が最高値の 53.5% となった時の水車効率 η_t を、発電機効率 η_g を 75% として (6) 式により計算すると、71.3% となり、微小水力における水車効率としては極めて高い値であった。

7. 考察

7-1 今後の改善点

表 3 に示すように、今回の発電実験により 100W 級水車は、設計目標値の 100 W よりも大幅に低い発電出力においても、従来水車よりも格段に高い効率で発電

表 3 発電実験測定結果及び改善による出力向上

測定結果		改善案の場合
有効落差	2.19 m	2.5 m
水車流量	0.681 l/s	1.0 l/s
理論水力	14.61 W	24.5 W
発電出力	7.82 W	14.2 W
直流発電出力	7.32 W	13.5 W
水車発電機総合効率	53.5 %	58 %
東芝 LED 防犯灯	6 個点灯	

できることが確認できたが、水車や水圧管を設置場所の落差や流量に合わせて最適化することにより発電出力、水車発電機総合効率のさらなる向上が可能と考えられる。今回の大芝湖における発電実験の場合については以下のような改善をおこなうことにより、表 3 に示すような発電出力、水車発電機総合効率の向上が可能と考えられる。

- (1) 水圧管の内径を今回の $\phi 38$ から $\phi 50$ に大きくし、水圧管部における損失落差を小さくする。
- (2) ノズル口径を今回の $8 \times 14 \text{ mm}$ から $10 \times 16 \text{ mm}$ に拡大し、水車流量を 1.43 倍 (0.97 l/s) にする。
- (3) 羽根車の直径 (今回 170 mm) を変更し、水車の効率が最大となる回転速度を発電機の効率が最大となる回転速度にできるだけ近づける。

7-2 発電出力の利用案

仮に、大芝湖に 100W 級水車を設置し、長期的に発電を行い、発電電力により、本実験で用いた東芝の LED 防犯灯を点灯するとした場合について考えると、LED 防犯灯 1 個を夜間に自動点灯させるために必要な 1 日当たりの電力量は、 $6.6 \text{ W} \times 12 \text{ h} = 79.2 \text{ Wh}$ となる。

一方、発電出力は、水圧管及び発電装置の改善により有効落差を 2.5 m、水車流量を 1.0 l/s にしたとすると、今回の発電出力の $(2.5 \times 1.0) / (2.19 \times 0.681) = 1.68$ 倍、即ち $7.82 \text{ W} \times 1.68 = 13.1 \text{ W}$ になる。発電出力の増加にともなって水車発電機総合効率が 58% に増加すると仮定すると、発電出力は $13.1 \text{ W} \times 58 / 53.5 = 14.2 \text{ W}$ となる。したがって 1 日当たりの発電電力量は、 $14.2 \text{ W} \times 24 \text{ h} = 340.8 \text{ Wh}$ となる。

三相交流発電出力を蓄電池に充電して使用する場合には、整流器で直流に変換し、充電制御装置を使用して蓄電池に蓄電し、蓄電池から得られる直流 12V の電流を交流 100V に変換して LED 防犯灯に供給することが必要となる。これらの変換・制御・蓄電・給電過程における電力損失を 40% とすると、上記 340.8 Wh の三相交流発電出力のうちで LED 防犯灯に供給される 100V 交流電流の電力量は $340.8 \text{ Wh} \times 0.6 = 204.5 \text{ Wh}$ となる。上述したように LED 防犯灯 1 個の場合に必要な電力量は 79.2 Wh であるので、発電出力により 6.6W の LED 防犯灯 2~3 個をほぼ定格の明るさで点灯させることができると推測される。

仮に、大芝湖において通年で発電するとした場合には、渇水期にはサイフォンで上の池の水を汲み出して水車に送水することになるため、渇水期にどの程度まで上の池から取水することができるか検討することが

必要となる。即ち、上の池の水位を維持管理上で問題のない所定の水位に保つために必要な取水流量の上限及び発電可能期間を計算し、それに基づいて渇水期における発電計画を作成することが必要と思われる。

8. むすび

今後、落差、流量の異なる種々の河川・水路等において発電実験を重ね、100W 級水車が適用可能な発電出力の範囲や水車発電機総合効率の確認を行い、実用化・商品化に向けて基礎的なデータや蓄積・整備していくことが必要と考えている。

また今後の課題として、技術的な面では発電した交流電力を蓄電池に充電するための取り扱いが容易で安全、安価なマイクロ水力発電用の充電制御装置の開発があり、また、技術の社会還元という面では、100W 級水車・多重衝突形水車の社会実装の実現・普及という課題があり、現在、その方策を模索中である。

表 4 今後の課題



謝 辞

本実験は、一般財団法人伊那谷財団の第 27 回（令和 5 年度）助成金により実施され、また本実験で使用した 100 W 級水車などの多重衝突形水車の開発は、第 11 回（平成 19 年度）助成以来、同財団より継続して支給していただいた助成金により行われたものであり、ここに同財団のこれまでの御支援に心より感謝申し上げます。また、大芝湖において本実験を実施するにあたり、実験の許可をいただいた南箕輪村役場観光森林課の関係各位に感謝申し上げます。水車の製作を委託した株式会社安田製作所 設計 の大山氏からは数々の有益、貴重なご助言をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 栗田秀實：多重衝突効果を取り入れた固定翼付垂直軸風車について；第 24 回風力エネルギー利用シンポジウム論文集, 211-214 (2002).
- 栗田秀實：多重衝突形垂直軸風車による環境調和型高効率風力発電の実現について；善光寺バレー研究報告会 2004 講演論文集, 15-20 (2004).
- 栗田秀實：垂直軸風車等の垂直軸駆動装置およびこれを用いた発電装置. 特許 4035537. 2007-11-02.
- 栗田秀實：同上. 特許 4054840. 2007-12-14.
- 栗田秀實：同上. 特許 4769782. 2011-06-24.
- H. Kurita. “Vertical Shaft Driving Device for Vertical Wind Mills or the Like and Electric Power Generator Using the Same”. United States Patent 7,094,017 B2. 2006 Aug. 22.
- H. Kurita. “Vertical Shaft Driving Device for Vertical Shaft Wind Mills or the Like, and Electric Power Generator Using the Same”. European Patent 1515039 B1. 2014-08-14.
- 栗田秀實：発電装置. 特許 6399406. 2018-09-14.
- H. Kurita. “Vaned Wheel for a Turbine, and Power Generation Device”. United States Patent 10,704,526 B2. 2020 Jul. 7.
- 全国小水力利用推進協議会, “小水力発電事例集 2007”, (2007.5).
- 全国小水力利用推進協議会. “小水力発電データベース”. <http://j-water.jp/database/>. (参照 2011-12-13).
- (財) 新エネルギー財団, “水力資源有効活用技術開発調査・小水力資源有効活用技術開発調査報告書 簡易発電システム設計マニュアルの策定 平成 18 年度”, (2007.3).
- (財) 広域関東圏産業活性化センター, “小水力発電導入手引書～未利用エネルギーの活用を目指して～”, (2007.3).
- 資源エネルギー庁・(財) 新エネルギー財団, “ハイドロバレー計画ガイドブック”, (2005.3)
- 長野県. “長野県の小水力発電施設”. website 信州. <http://www.pref.nagano.lg.jp/housei/nochi/suiryoku/index.htm>. (参照 2011-02-22).
- 石田 正, “超小型 (ピコ) 水力発電装置製作ガイドブック”, パワー社, (2007).
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構, “マイクロ水力発電導入ガイドブック”, (2003.3).
- 日本機械学会編, “機械工学便覧 応用編 B5 流体機械”, 30-31, 47, 63-64, 174(1997).
- ターボ機械協会編, “ハイドロタービン 新改訂版”, 22-24, 47 (2007).
- 千葉 孝, “最新高級電験講座 第 11 巻 水力発電所”, 電気書院, 73, 142-145 (1976).

【事例紹介】

学術雑誌 **Small** への研究論文掲載について —ルビー単結晶の大幅な育成低温化に関する研究—

機械システム学科 鮎沢俊輔

1. まえがき

南信工科短期大学は信州大学工学部（物質化学科手嶋勝弥教授）と長年共同研究を続けてきた。その成果として、単結晶を溶液から育成するための新規プロセスを世界で初めて発見し、それを応用して融点約2050℃のルビー単結晶を750℃で育成することに成功した。この育成低温化技術は環境負荷低減でSDGsに貢献するとともに、高融点物質の低融点基板上への直接成長など新たな材料開発に応用できる可能性があり、機能材料開発の新しい結晶成長法として強く期待される。本研究は、ナノテクノロジーを扱う世界的なトップジャーナル Wiley-VCH 社の『Small』（2023 IF: 13.0）に研究論文として掲載され、掲載誌の Frontispiece として選出された。Frontispiece を図1に示す。また、本研究に関する記者会見を南信工科短期大学にて実施した。記者会見の様子を図2に示す。

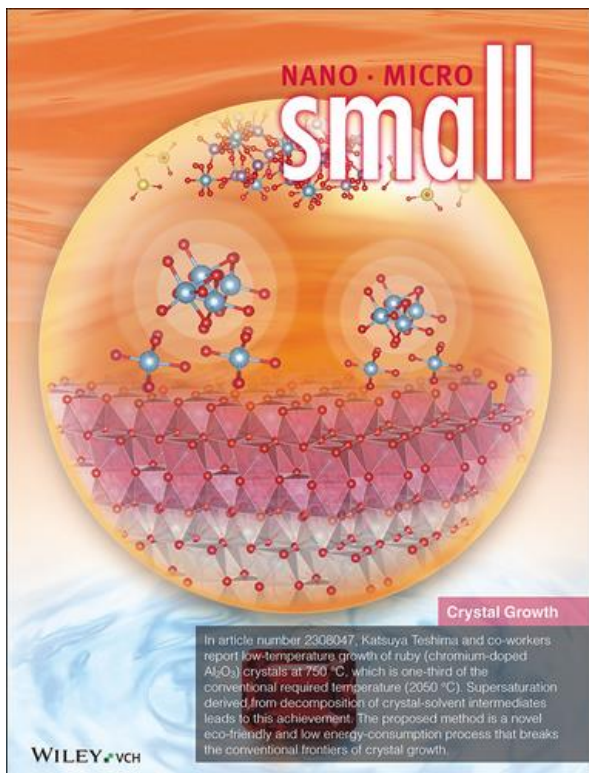


図1 『Small』に選出された Frontispiece
(Represented from Small, Wiley-VCH)



図2 記者会見の様子

2. 論文要旨

ルビー単結晶の溶液からの育成は、食塩水からの食塩結晶育成と基本原理は同じである。食塩の場合、食塩を溶質、水を溶媒として育成する。ルビー単結晶の場合、酸化アルミニウム(Al_2O_3)と酸化クロム(Cr_2O_3)を溶質とし、酸化モリブデン(MoO_3)に酸化ナトリウム(Na_2O)を加えた溶媒（フラックス）から育成する。フラックスは電気炉で熱することによって液化する。そこに溶質が溶解する。一般的には、フラックスの冷却や蒸発によって溶解できなくなった溶質が析出し、結晶として成長する。図3にルビー結晶育成実験の概念図を示す。

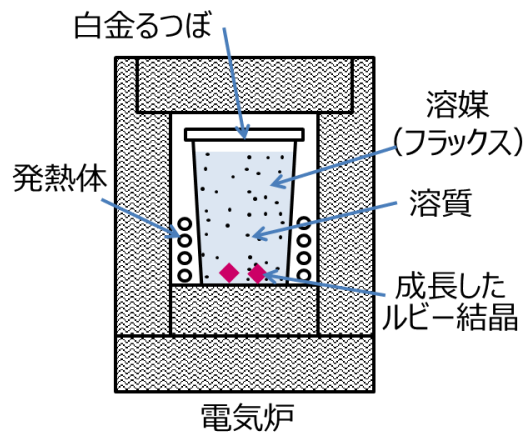


図3 ルビー結晶育成実験の概念図

フラックスの蒸発または冷却を伴う従来のルビー結晶成長プロセスでは少なくとも約 1100°C という高温が必要であった。今回、溶質とフラックスの化合物をあらかじめ形成し加熱により分解して生成した微粒子が単結晶成長する現象を発見し、それを応用してルビー単結晶を 750°C で育成することに成功した。新規プロセスの概念を図 4 に示す。

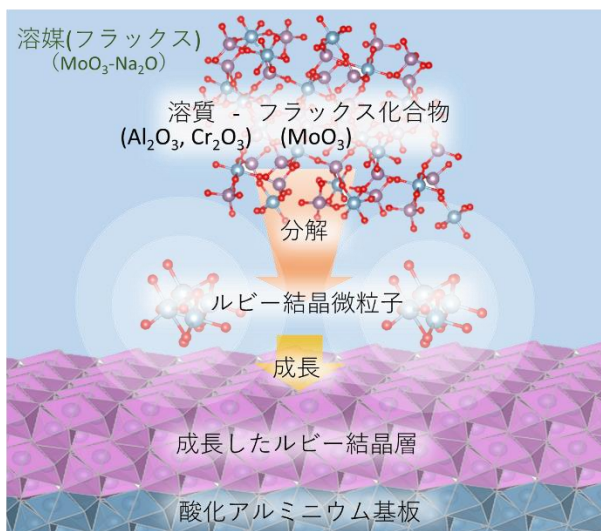


図 4 新規プロセスの概念図

ルビー単結晶は、酸化アルミニウム単結晶基板上に数ミクロンのルビー単結晶層として成長した。ルビー結晶層が表面に成長した酸化アルミニウム基板の写真を図 5 に示す。

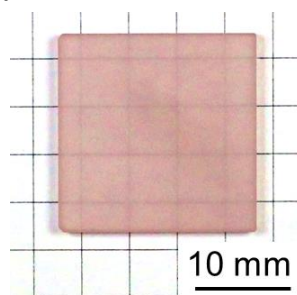


図 5 ルビー結晶層が表面に成長した酸化アルミニウム基板の写真

原子レベルでの観察により、高品質のルビー結晶層が酸化アルミニウム基板上にエピタキシャル成長していることが確認できた。ルビー結晶層と酸化アルミニウム基板界面の透過型電子顕微鏡写真を図 6 に示す。

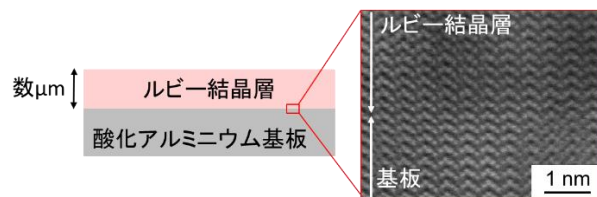


図 6 ルビー結晶層と酸化アルミニウム基板界面の透過型電子顕微鏡写真

3. む す び

南信工科短期大学校と信州大学工学部の共同研究は、革新的な結晶成長技術の開発に成功し、環境負荷の低減や新材料の開発に大きく貢献した。今後もこの技術を基盤として、さらなる応用研究が進められ、持続可能な社会の実現に向けた新たな材料科学の発展が期待される。本研究は、南信工科短大振興会研究補助金を受けて実施された。記して謝意を表す。

発表した論文

Shunsuke Ayuzawa, Tetsuya Yamada, Hiroh Miyagawa, Shuji Oishi, Katsuya Teshima; Low-temperature Ruby Crystal Growth Via a Supersaturation Process Based on Flux Decomposition; *Small*, 20, 18, 202308047, (2024).

【事例紹介】

職業能力開発短期大学校と大学への編入学

武田三男

1. まえがき

一昨々年（2021年）9月末で信州大学の理事・副学長を任期満了で退職し、一昨年4月より「長野県南信工科短期大学校（以下略称：南信工短）」に校長として勤めることになりました¹⁾。南信工短は、長野県南部の上伊那地域の南箕輪村にある、9年前に開校したばかりの機械システム学科と電気システム学科の2学科（入学定員が各学科20名、全校で定員80名）のたいへん小さな公立（長野県立）の高等教育機関です。本校は、長野県では上田市に1995年に開校した長野県工科短期大学校（以下：工科短大）がありますので県下2校目の「職業能力開発短期大学校」（以下：職能短大、人によっては能開短大と略す場合もありますが本稿では職能短大を採用します）となります。

職能短大の管轄は文部科学省ではなく厚生労働省です。短期大学でなく名称も短期大学校と「校」が付きます。長野県庁内でも県立の大学の管轄とは別の産業労働部の所管です。歴史的には、既存の「技術専門学校」（高校新卒者や離職者・求職者が地元の企業等に就職するために必要となる電気工事、自動車修理、機械工作、木工工作、木造建築などの実践的スキルを1年ないし2年間で身につけさせることを目的とした職業訓練校）を産業技術の革新に対応すべく拡充改組した2年制の短期大学校という設立経緯があります。このような職業能力開発法に基づいて設置された厚生労働省管轄の公立の職能短大は分校も含めて全国に21校あります（県立：19校、雇用促進事業団立：2校）。これとは別に厚生労働省直下（国立）の短期大学校が全国で26校設置されていましたが、そのすべてが4年制の「職業能力開発大学校」附属の短期大学校として改組されています。またこの他に、東京都には4年制の「職業能力開発総合大学校」が設置されています。

本稿では、最初に全国に設置されている大学校及び短期大学校についてその全体像を紹介します。次に、職業能力開発短期大学校について長野県南信工科短期大学校を例にカリキュラムの概要と課題を紹介します。最後に今年度から可能になった4年制大学への編入学

制度の目的とその課題について議論します。

2. 職業能力開発短期大学校

2.1 省庁大学校

文科省以外の省庁管轄の高等教育機関（以下：省庁大学校）を表Iにまとめました。良く知られている国交省の「気象大学校」、「海上保安大学校」、「航空大学校」、「航空保安大学校」、「国土交通大学校」に防衛省管轄の「防衛大学校」と「防衛医科大学校」、農水省の「水産大学校」、総務省の「自治大学校」と「消防大学校」、警察庁の「警察大学校」、財務省の「税務大学校」、そして厚労省の「国立看護大学校」、「職業能力開発総合大学校」、「職業能力開発大学校」、「職業能力開発短期大学校」の16種類の大学校・短期大学校が設置されています。この省庁大学校うち短期大学校は「職業能力開発短期大学校」だけです。長野県では上田市の工科短大と南箕輪村の南信工短もこの仲間です。（尚、この省庁管轄の大学校の他にも「大学校」の名称を使用している教育機関はいくつかあります。長野県には県立の長野県農業大学校、長野県林業大学校そして長野県福祉大学校が設置されています。）

これらの省庁管轄の大学校のうち、文科省の設置審議会の課程認定の審査を通り、大学改革・学位授与機構から学位授与機関の認定を受けて「学位」が授与できるのは、表Iに記載しましたように、気象大学校、海上保安大学校、防衛大学校、防衛医科大学校、水産大学校、国立看護大学校、および職業能力開発総合大学校の7校のみです。職業能力開発総合大学校は職業能力開発大学校の中では全国で唯一の「学士（生産技術）」の学位授与機関に認定されています。さらには、大学院も設置されていて「修士（生産工学）」を授与できます。

厚生労働省関係の独立行政法人高齢・障害・求職者雇用支援機構が運営する「職業能力開発大学校」を表IIにまとめました。職業能力開発大学校は北海道、東北、関東、北陸、東海、近畿、中国、四国、九州、沖縄の10校がそれぞれの地域に設置されています。表IIに示

表Ⅰ 省庁大学校（文部科学省以外の省庁所轄の高等教育機関）

校名	管轄省庁	学位
防衛大学校	防衛省	学士（社会科学）、学士（理学）、学士（工学）、学士（人文科学）、 修士（工学）、修士（理学）、修士（社会科学）、修士（社会科学）、 博士（工学）、博士（理学）
防衛医科大学校	防衛省	学士（医学）、学士（看護学）、博士（医学）
水産大学校	農水省	学士（水産学）、修士（水産学）
海上保安大学校	国交省	学士（海上保安）
気象大学校	国交省	学士（理学）
職業能力開発総合大学校	厚労省	学士（工学）、学士（生産技術）、修士（工学）、修士（生産工学）
国立看護大学校	厚労省	学士（看護学）、修士（看護学）、博士（看護学）
警察大学校	警察庁	
税務大学校	財務省	
航空大学校	国交省	
航空保安大学校	国交省	
職業能力開発大学校	厚労省	
職業能力開発短期大学校	厚労省	
国土交通大学校	国交省	
自治大学校	総務省	
消防大学校	総務省	

表Ⅱ 職業能力開発大学校

校名	所在地	旧短期大学校名
北海道職業能力開発大学校	北海道	（元・北海道職業能力開発短期大学校）
東北職業能力開発大学校	宮城	（元・宮城職業能力開発短期大学校）
関東職業能力開発大学校	栃木	（元・小山職業能力開発短期大学校）
北陸職業能力開発大学校	富山	（元・富山職業能力開発短期大学校）
東海職業能力開発大学校	岐阜	（元・岐阜職業能力開発短期大学校）
近畿職業能力開発大学校	大阪	（元・大阪職業能力開発短期大学校）
中国職業能力開発大学校	岡山	（元・岡山職業能力開発短期大学校）
四国職業能力開発大学校	香川	（元・香川職業能力開発短期大学校）
九州職業能力開発大学校	福岡	（元・北九州職業能力開発短期大学校）
沖縄職業能力開発大学校	沖縄	（元・沖縄職業能力開発短期大学校）

すように、これらはもともと設置されていた短期大学校を大学校に改組したものです。

また、これらの大学校には周辺の短期大学校も附属として再編されています（表Ⅲ）。職業能力開発大学校に附属する職能短大は、青森、秋田、千葉（千葉と成田）、新潟、石川、浜松、滋賀、京都、島根、福山、高知および川内の13校あります。かつては独立した職能短大でしたが、1999年から2001年にかけて順次、職業能力開発大学校8校の各附属校となりました。

南信工短と同じ県立の職業能力開発短期大学校は表Ⅳに示すように、山形、神奈川、長野、岩手、熊本、大分、山梨、岐阜、茨城、広島、福島、静岡の各県に分校を含めると19校が設置されています。尚、静岡県には浜松市に国立（独立行政法人高齢・障害・求職

者雇用支援機構が運営する）の東海職業能力開発大学校・附属浜松職業能力開発短期大学校がありましたが、さらに2021年に静岡市と沼津市に県立の静岡県立工科短期大学校の2校が設置され合計3校となっています。

このほかに独立行政法人高齢・障害・求職者雇用支援機構が運営する短期大学校は港湾職業能力開発短期大学校の2校（港湾職業能力開発短期大学校横浜校、港湾職業能力開発短期大学校神戸校）があります。

2.2 職業能力開発短期大学校の設立背景

歴史的に見れば、職能短大の誕生には、1980年以降に電子工学技術の発展によるME（Microelectronics）技術の急速な発展に伴う労働様態と環境の変化が背景としてあります。工場の現場ではME化に対応しME

表Ⅲ 職業能力開発大学校付属の職業能力開発短期大学校

校名	所在地
東北職業能力開発大学校・附属青森職業能力開発短期大学校 (元・青森職業能力開発短期大学校)	青森
東北職業能力開発大学校・附属秋田職業能力開発短期大学校 (元・秋田職業能力開発短期大学校)	秋田
関東職業能力開発大学校・附属千葉職業能力開発短期大学校 (元・千葉職業能力開発短期大学校)	千葉
関東職業能力開発大学校・附属千葉職業能力開発短期大学校成田校 (元・千葉職業能力開発短期大学校成田校)	千葉
北陸職業能力開発大学校・附属新潟職業能力開発短期大学校 (元・新潟職業能力開発短期大学校)	新潟
北陸職業能力開発大学校・附属石川職業能力開発短期大学校 (元・石川職業能力開発短期大学校)	石川
東海職業能力開発大学校・附属浜松職業能力開発短期大学校 (元・浜松職業能力開発短期大学校)	静岡
近畿職業能力開発大学校・附属滋賀職業能力開発短期大学校 (元・滋賀職業能力開発短期大学校)	滋賀
近畿職業能力開発大学校・附属京都職業能力開発短期大学校 (元・京都職業能力開発短期大学校)	京都
中国職業能力開発大学校・附属島根職業能力開発短期大学校 (元・島根職業能力開発短期大学校)	島根
中国職業能力開発大学校・附属福山職業能力開発短期大学校 (元・福山職業能力開発短期大学校)	広島
四国職業能力開発大学校・附属高知職業能力開発短期大学校 (元・高知職業能力開発短期大学校)	高知
九州職業能力開発大学校・附属川内職業能力開発短期大学校 (元・川内職業能力開発短期大学校)	鹿児島

表Ⅳ 職業能力開発大学校（県立）

校名	所在地
福島県立テクノアカデミー職業能力開発短期大学校（郡山・浜・会津）	福島
岩手県立産業技術短期大学校（矢巾・水沢）	岩手
山形県立産業技術短期大学校（山形・酒田）	山形
茨城県立産業技術短期大学校	茨城
神奈川県立産業技術短期大学校	神奈川
山梨県立産業技術短期大学校（塩山・都留）	山梨
長野県工科短期大学校	長野
長野県南信工科短期大学校	長野
岐阜県立国際たくみアカデミー職業能力開発短期大学校	岐阜
広島県立技術短期大学校（愛称：テクノカレッジ広島）	広島
熊本県立技術短期大学校	熊本
大分県立工科短期大学校	大分
静岡県立工科短期大学校（静岡・沼津）	静岡

化を推進できる知識と能力を有した新しいタイプの技術者（具体的には PLC[Programmable Logic Controller] を扱える人材）が必要になりました。（このタイプの

技術者を人によっては、ブルーカラーと技術者の中間の「テクニシャン」と呼んでいます。分かりにくいので本稿では「新しいタイプの技術者」と記述しまし

た。) これを受けて、これまで各県に「職業訓練」のために設置されていた「技術専門校」の一部が「職業能力開発短期大学校」として拡充再編されました²⁾。

さらに、1995(平成7)年の職業能力開発法の改正に伴い、職業訓練課程(授業を厚労省管轄の学校では訓練と呼ぶ。文科省管轄の学校における教育課程に当たる)がこれまでの対象者別の分類から授業内容(訓練内容)のレベルと時間とを基準とした分類に変更となりました²⁾。長野県でもこのような背景下で同年4月に上田市に技術専門校を発展充実させた工科短大を設置しました。

一方、南信工短の設立の背景は少し異なります。長野県は他の多くの都道府県とは異なり南北に長く、中信の松本市の三才山峠を越えた上田市に設置されている工科短大は南信地方の住民にとっては愛知県や静岡県よりも距離的に遠く感じられます。また、近年、少子高齢化が全国の中でも最も速く進む長野県にあっても南信地域の人口動態は一番速く進んでおり、18歳人口が急速なペースで減少しています。このため、地元の工業高校の卒業生が東京や名古屋などの都会へ就職したり進学したりすることも相まって、地元出身の若者が地域企業に就職しない状況が長く続いています。長野県下といえどもいったん東信の上田市にある工科短大に進学した学生が南信地域に戻って就職してもらえないという切実な課題が顕在化していました。南信地域にはものづくり産業が盛んでイノベーション志向も強い実績のある中堅優良企業が多数活動しています。この南信地域の若者を地元につなぎ留めておくためにも、新たなイノベーションに対応できる知識と技術を持った即戦力の技術者の育成機関の設置が強く望まれていました。これを受けて2016年に南信工短が現在の建っている場所にあった伊那技術専門校を拡充改組して設置されました。

2.3 教育課程(カリキュラム)

2.3.1 授業科目及び単位数

職能短大の教育課程(カリキュラム)には専門課程(2年間)および短期課程(半年間)の2課程が設置されています。(短期課程は主に在職者の技能向上と離職者・転職者対象の早期就職を支援する目的として設置されていますので一般の大学の教育課程との比較対象とはなりにくいのでここでは割愛させていただきます。)専門課程における科目及び単位数は、職業能力開発促進法施行規則(昭和44年労働省令第24号)別表に定める基準を参酌し定められています。本校の

ような公立の職能短大では、現在は職業能力開発総合大学校の附属施設である「基盤整備センター」が公開している技術科(学科)ごとの「標準カリキュラム」に準拠したカリキュラムを策定しています。これは、基準であっても文科省の設置基準に基づいた課程認定を受けることまでは要求されていない標準的なものに過ぎません。したがって、科目名や時間数も職能短大の独自裁量で設定可能な範囲が許容されています。

表Vに標準カリキュラム(職業能力開発総合大学校基盤整備センターのHPより)と南信工短の機械システム学科および電気システム学科のカリキュラムを示します。「標準カリキュラム」の設定によると授業科目は「一般教育科目(教養科目に当たる)」および「専門教育科目」に区分し、専門教育科目は「基礎学科」・「基礎実技」・「専門学科」・「専門実技」に区分されます。一般教育科目については、人文科学・社会科学・自然科学・保健体育・外国語の分野から設定し、12~18単位を原則としています。一般教育科目及び専門教育科目、標準カリキュラムの授業科目及び単位数を必修とすること。基礎実技及び専攻実技の単位数は、系基礎学科及び専攻学科の単位数を上回るように設定すること(ただし、系基礎学科及び専攻学科の合計単数は、50単位を下回らないようにすること)となっています。全ての学科に「総合制作実習」(卒業研究に当たる)を必修として設けること等が定められています。

授業時間については、年間1400時間以上を標準として、2年間で2800時間を下回らないことが定められています。また、単位については18時間をもって1単位としています。(尚、100分授業を2時間と換算している)。表Vにもありますように、総授業時間は合計156単位(2808時間:1単位は100分授業を18回=18時間)です。機械システム系制御技術科の標準科目は区分ごとに一般教育科目(12)、基礎学科(20)、基礎実技(12)、専攻学科(24)、専攻実技(52)の合計120単位となっています。また、電気エネルギー制御科の標準科目は区分ごとに一般教育科目(12)、基礎学科(24)、基礎実技(16)、専攻学科(26)、専攻実技(52)の合計130単位となっており、機械システム系制御技術科より10単位多くなっています。基礎実技及び専攻実技の単位数は、系基礎学科及び専攻学科の単位数を上回るように設定することが定められています。ただし、それに加えて、系基礎学科及び専攻学科の合計単数が50単位を下回ら

表V 標準カリキュラムと南信工科短大の機械および電気システム学科の授業科目の対応表

標準カリキュラム						南信工科短期大学校										
機械システム系 制御技術科						機械システム学科										
科目	教科の科目	授業科目	*単位数	科目	授業名	*単位数	科目	教科の科目	授業科目	*単位数	科目	授業名	*単位数			
一般教育科目	人文科学	キャリア形成論	2	日本語表現		2	人文科学	キャリア形成論		2	日本語表現		2			
	社会科学	職業社会概論	2	社会学		1	社会科学	職業社会概論		2	社会学		1			
				知的所有権		1	知的所有権		1							
	自然科学	数学	2	基礎数学		2	自然科学	数学		2	基礎数学		2			
				物理学		2	物理学		2							
				数学演習		2	数学演習		2							
	外国語	英語 I	2	解析学概論		2	外国語	英語 I		2	解析学概論		2			
				英語 II		2	英語 II		2							
	保健体育	保健体育	2	体育 I		2	保健体育	保健体育		2	体育 I		2			
				体育 II		1	体育 II		1							
一般教育科目 計			12	一般教育科目 計			15	一般教育科目 計			12	一般教育科目 計			15	
系基礎学科	制御工学概論	機械制御	2	制御工学概論		2	制御工学概論		2	制御工学概論		2	制御工学概論		2	
	電気工学概論	電気工学概論	2	電気工学概論		2	電気工学概論		2	電気工学概論		2	電気工学概論		2	
	情報工学概論	コンピュータ基礎	2	情報工学概論		2	情報工学概論		2	情報工学概論		2	情報工学概論		2	
				工業材料 I		2	工業材料 I		2	工業材料 I		2				
	材料工学	工業材料 II	2	工業材料 II		2	材料工学	工業材料 II		2	工業材料 II		2			
				機械数学		2	機械数学		2	線形代数 (選択)		2				
	力学	工業力学 I	2	工業力学 II		2	工業力学 II		2	工業数学 (選択)		2	線形代数 (選択)		2	
				材料力学 I		2	材料力学 I		2	物理学		1				
				材料力学 II		2	材料力学 II		2	力学演習		1				
				基礎製図		2	基礎製図		4	熱力学		1				
				生産工学		2	生産工学		2	材料力学 I		1				
	安全衛生工学	安全衛生工学	2	安全衛生工学		2	安全衛生工学		2	材料力学 II		1				
	系基礎学科 計			20	系基礎学科 計			21	系基礎学科 計			24	系基礎学科 計			22
	専攻学科	機械加工	機械加工 I	2	機械加工 I		2	機械加工	機械加工 I		2	機械加工 I		2		
		機械工学	機械工作	2	機械加工 II		2	機械加工 II		2	機械加工 II		2			
機械設計製図 I						4	機械設計製図 I		4							
メカトロニクス工学		メカトロニクス工学	2	メカトロニクス工学		2	メカトロニクス工学		2	メカトロニクス工学		2				
制御工学		シーケンス制御	2	シーケンス制御		2	シーケンス制御		2	シーケンス制御		2				
				油圧・空圧制御		2	油圧・空圧制御		2							
計測工学		センサ工学	2	流体工学		2	流体工学		2	測定工学		2				
				電子工学		2	電子工学		2	電子工学		2				
電子工学		デジタル回路	2	デジタル回路		2	デジタル回路		2	デジタル回路		2				
				コンピュータ制御		2	コンピュータ制御		2	マイコン制御		2				
システム設計		メカニズム	2	システム設計		2	システム設計		2	システム設計		2	システム設計		2	
				ゼミナール I		2	ゼミナール I		2	ゼミナール I		2				
				ゼミナール II		2	ゼミナール II		2	ゼミナール II		2				
				ゼミナール III		2	ゼミナール III		2	ゼミナール III		2				
				ゼミナール IV		2	ゼミナール IV		2	ゼミナール IV		2				
専攻学科 計			24	専攻学科 計			30	専攻学科 計			26	専攻学科 計			33	
系基礎実技	電気工学基礎実験	電気工学基礎実験 I	2	電気工学基礎実験 I		3	電気工学基礎実験	電気工学基礎実験		4	電気基礎実験		4			
	電気工学基礎実験	電気工学基礎実験 II	2	電気工学基礎実験 II		2	電子工学基礎実験	電子工学基礎実験		4	電子デバイス基礎実験		2			
				情報処理実習		4	情報処理実習		4	アナログ回路基礎実験		2				
	情報処理実習	情報処理実習	4	情報処理実習		4	安全衛生作業法	安全衛生作業法		2	デジタル回路基礎実験 I		2			
	安全衛生作業法	安全衛生作業法	2	安全衛生作業法		2	安全衛生作業法		2	デジタル回路基礎実験 II		2				
	系基礎実技 計			12	系基礎実技 計			13	系基礎実技 計			16	系基礎実技 計			18
専攻実技	機械工学実験・実習	機械加工実習	4	機械加工実習 I		8	機械工学実験・実習	機械加工実習		4	機械工作実習		2			
	メカトロニクス実習	メカトロニクス実習	4	測定工学実習		2	メカトロニクス実習	メカトロニクス実習		4	シーケンス制御実習 I		6			
				制御工学実験		2	制御工学実習 I		1	シーケンス制御実習 II		4				
	電子工学実習	マイコン制御実習	4	制御工学実験		4	制御工学実習 II		4	シーケンス制御実習 II		2				
				コンピュータ制御実習		4	コンピュータ制御実習		4	空気圧実習		2				
	設計及び製図実習	CAD実習 I	2	制御工学実験		4	制御工学実習 III		3	CAD実習		4	制御プログラミング基礎実		1	
				コンピュータ制御実習		4	コンピュータ制御実習		4	制御実習製作実習		4	制御プログラミング実習 I		4	
				設計製図実習 I		4	設計製図実習 II		4	FAシステム構築実習 I		2	FAシステム構築実習 II		6	
				CAD実習 II		2	設計製図実習 III		8	産業用ロボット制御実習		2	電気機器実験		2	
				CAD実習 III		2	総合課題		12	環境・エネルギー有効利用実習	電気・電子計測実習		2	環境エネルギー実習		4
	(総合製作実習)	総合製作実習	12	卒業研究		24	自動制御実習	制御プログラミング実習		4	制御プログラミング実習 I		2			
	専攻実技 計			52	専攻実技 計			77	専攻実技 計			52	専攻実技 計			68
	標準科目計			120	標準科目計			120	標準科目計			130	標準科目計			130
	標準外科目計			36	標準外科目計			36	標準外科目計			26	標準外科目計			26
	合計			156	合計			156	合計			156	合計			156

・単位数が空欄もしくは0付の科目は受講推奨科目。
 ・系基礎実技の「安全衛生作業法」は同系の実技科目に含める。
 ・南信工科短期大学校の授業時間については、100分の授業を18回(1800分=30時間を「2」と記載。

ないようにすることという制約があります。

南信工短の機械システム学科では一般教育科目が8科目13単位、基礎講義（系基礎学科）が16科目25単位（このうち4科目は選択必修で2科目を履修）、基礎実技（系基礎実技）が5科目13単位、専攻講義（専攻学科）が16科目30単位、および専攻実技13科目75単位の合計156単位を開講しています。標準カリキュラムと比較すると標準科目の区分ごとに一般教育科目は+1、基礎学科は-4単位、基礎実技は+1、専攻学科は+4、専攻実技+23単位の合計156単位を開講しています。一方、電気システム学科では一般教育科目が8科目13単位、基礎講義（系基礎学科）が12科目26単位（このうち4科目は選択必修で2科目を履修）、基礎実技（系基礎実技）が7科目18単位、専攻講義（専攻学科）が15科目33単位及び専攻実技12科目66単位の合計156単位を開講しています。標準カリキュラムと比較すると、標準科目の区分ごとに一般教育科目は+1、基礎学科は+1単位、基礎実技は+2、専攻学科は+7、専攻実技+14単位の合計156単位を開講しています。

標準科目以外の科目の合計単位数は機械システム系制御技術科では36単位、また電気エネルギー制御科では26単位です。この部分が職能短大の裁量に任されています。すなわち、標準科目以外の科目は選択必修科目として開講できるものと解釈できます。両学科とも標準科目に加え標準科目以外の科目をそろえることにより総単位数を標準カリキュラムに準拠し156単位、合計授業時間2808時間を開講しています。この単位を超えて開講する科目は純粋な選択科目として開講することができます。しかしながら、年間1400時間とは、月曜から金曜日の1コマ目から4コマ目（1コマ100分授業）を18回（週）受講して達成できる時間数となっています。このため選択科目を開講して

も学生が受講することは殆ど不可能な状況にあります。技術力ばかりでなく創造力や応用力と高い教養を身に付けた人材を育成するためには学生の自主的な学習が極めて重要です。そのためには選択科目の開講とそれを受講できる時間を保証することが不可欠です。

2. 3. 2 授業時間

前述のように職能短大の専門課程の授業時間は合計2,800時間以上にも達します。例として下図に長野県工科短期大学校の知能情報システム科の授業時間と構成比を示します（図1）。卒業研究の半分以上が実習科目になりますので、実質的に授業時間の半分以上が実習科目で占めていると言えます。

編入学で障害となっているのは職能短大における教育課程（職業訓練）内容が大学におけるものと同等の内容であるかという点です。文科省ではこれに関する基準を「教育の質保証」と呼んでいます。教育課程の内容は大きく分けると、授業内容と授業時間数になりますが、授業内容については各科目のシラバスで確認が可能ですし、平成26年には職業短大の授業内容と実施時間数が大学・短期大学におけるそれらと同等であることが認められて同年9月に文科省告示が改正され、職業能力開発施設（職業開発大学校及び職業能力開発短期大学校）における学習について大学における単位認定の対象となることが可能となりました。³⁾ これを受けて、茨城大学や琉球大学等では、いち早く全国にさきがけて関係する大学規定等を改正し職能短大の授業が大学における単位認定の対象となることが可能となりました。

次に、授業時間ですが、こちらは職能短大の卒業（修了）要件は授業時間制を採用しているため、単位制の大学の授業時間との換算が必要となります。以下に、尾原祐三熊本県立技術短期大学校長の手法に倣って職能短大と大学における総授業時間数に比較検討を

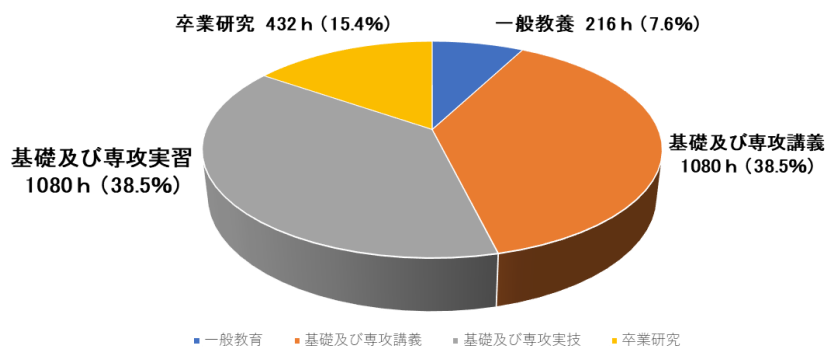


図1 長野県工科短期大学校の知能情報システム科の授業時間と構成比

行ってみます⁴⁾。これは、単位互換や既修得単位認定において不可欠な解決課題です。単位制の場合は授業時間以外の自主的学習時間（予習と復習に費やした時間）を考慮しなければならないため換算が複雑になりますので、大学または学校で実際に受講した授業時間で両者における教育を受けた時間を比較してみます。

まず、実際の職能短大の専門課程（2年間）の教育課程（カリキュラム）の授業時間を計算してみます。講義・演習科目では1単位当たり100分授業（学校によっては90分授業の場合もある）が18コマ（回）で、実習・実験科目でも1単位当たり100分授業が18コマ（回）です。1コマあたりの授業時間は90～100分ですがこれを大学と同様に1時間(H)として計算します。南信工短の電気システム学科を例にとると、一般教育科目が8科目13単位、基礎講義科目が12科目26単位、専攻講義科目が15科目33単位、基礎実技科目が7科目18単位および専攻実技科目が12科目66単位開講されています。合計156単位で授業時間数は156単位×18時間/単位=2808時間となります。以上を座学か実技かでまとめますと、職能短大では授業科目のほぼ半分が座学（講義・演習）科目で残りの半分が実技（実験・実習）科目ですので平均の総授業時間数は2808時間となります。

・講義・演習

$$156[\text{単位}] \times 18[\text{時間(H)}/\text{単位}] \times (1/2) = 1404 \text{ 時間(H)}$$

・実験・実習

$$156[\text{単位}] \times 18[\text{時間(H)}/\text{単位}] \times (1/2) = 1404 \text{ 時間(H)}$$

・合計

$$2808 \text{ 時間(H)}$$

次に、比較のため大学での授業時間を概算してみます。大学では講義・演習科目では1単位当たり90～100分授業が15コマ（回）で、実習・実験科目では1単位当たり90～100分授業が30コマ（回）です。理工学系の学部では授業科目のほぼ2/3が講義・演習で残りの1/3が実験・実習となっています。卒業要件は各大学各学部で異なりますが平均で124単位です。1コマあたりの授業時間は90～100分でこれを職能短大と同様に1時間(H)として計算しますと、大学での4年間の総授業時間数は下記のように2480時間となります。

・講義・演習

$$124[\text{単位}] \times 15[\text{時間(H)}/\text{単位}] \times (2/3) = 1240 \text{ 時間(H)}$$

・実験・実習

$$124[\text{単位}] \times 30[\text{時間(H)}/\text{単位}] \times (1/3) = 1240 \text{ 時間(H)}$$

・合計

$$2480 \text{ 時間(H)}$$

この大学における総授業時間数は職能短大の2年間の2800時間を大きく下回ります。逆に職能短大では非常に密な授業を実施していると言えます。実際に、職能短大学生は月曜日の1コマ目から金曜日の4コマ目までほとんどすべての時間が必修科目で占められています。その授業時間のうち半分以上が実技（実験・実習）授業となっています。

3. 編入学制度

3.1 編入学特区への申請

職能短大に在学する勉学意欲の高い学生の進路としては同じ厚労省管轄の職業能力開発大学校があります。ここでは、「専門課程」の修了後にさらに2年間の「応用課程」が設置されています。職能短大からはこの応用課程へ進学（編入学ではありません）が可能です（一方、4年制の「総合課程」のみが設置されている職業能力開発総合大学校には編入学も進学できません）。本校では卒業生を送り出した6年間（2023年度現在）で5名が東海職業能力開発大学校へ進学しています。この進学実績から見ても学習意欲の高い学生には大学への編入学の道を作っておくことが重要と考えています。

職能短大からは大学への編入学ができないという省庁間の壁をなんとか超えたいと、長野県や熊本県の職能短大では2003（平成15）年から、また山形県では2009（平成21）年に政府（内閣府・厚労省・文科省）に働きかけてきました。これを受けて、前述のように2014（平成26）年にまずは職業能力開発短期大学校での学修を大学における単位認定の対象とする（単位互換制度）文科省告示の改正がなされました（文科省告示第123号 平成26年9月1日）⁴⁾。一方で、編入学については、中央教育審議会において、実態に照らして、大学相当の教育であると認められることが必要であり、単位認定の実績を踏まえる必要があるため、引き続き検討課題とされていました。本件については、「関係府省庁において今後前向きに検討を進める規制改革事項等」として分類され、2018（平成30）年の構造改革特別区域推進本部において、2021（令和3）年度までに制度改正について検討を行うこととされていました。この間、専修学校等からは職能短大から大

学への編入学について、強い懸念という形での反対意見の表明が全国専修学校各種学校総連合会副会長名で出されています（2021年10月）。これによると、職能短大はその設置目的から教育機関ではなく卒業後はすぐに企業等に就職するための職業訓練機関であり、その卒業生は大学の編入学の対象にならないとの見解のようです。しかしながらこの表明は、職能短大の進学先には前述のように全国に13の職業能力開発短期大学校が設置されていることから説得力はあまりないように思われます。また、職能短大の実施している授業（訓練）の内容が大学や短期大学のそれらと同等の内容であることや人材育成の観点から最も重要な「学生の進路選択の多様性の確保」についてはあまり考慮されていないように思われます。

このような懸念表明にもかかわらず、一昨年（2022年）5月に内閣府から提出されていた「職業能力開発短期大学校から大学への編入学制度に関する構造改革特別区域計画」法案（いわゆる編入学特区法案）が国会で可決成立しました。⁵⁾ これに長野県からは「長野県地域中核人材育成特区」を10月に申請し、昨年（2023年）1月に内閣府から採択の通知を受けることができました。尚、今回は長野県と熊本県がこの編入学特区に申請し、採択されました。⁶⁾ 続いて3月には山形県が申請し採択され、現在は全国で3県の職能短大の学生にそれぞれの県内の大学への編入学の道が拓かれています。

この構造改革特区事業を活用することにより、実践的技能・技術の教育に強い工科短期大学校と工学の基礎理論と研究に重きを置いた教育を実践している大学が連携して共同教育を実施したいと考えています。工科短期大学校において先端の技能を習得した学生が大学へ編入学し、実践的で高度な技能・技術力に加え、

大学において研究開発力やマネジメント力を身に付けた両者のスキルを兼ね備え、中心となって地域の技術革新を支える新しいタイプの地域中核人材を育成する教育システムを構築することを目指しています。この教育システムを修了し知識と技術を修得した新しいタイプの地域中核人材は、ものづくり企業の業務担当で見ると「生産技術」・「設計」・「開発」・「研究部門」にわたる幅広い職務に就くことができます（図2）。この新しい技術者は大企業のように専門部門別の職員を準備できない中小の企業では中核的人材として、一方、大企業ではこれらの部門間の橋渡しのできる人材としての活躍を期待しています。

3.2 大学との連携と単位互換制度

お陰様で2023年の1月5日に内閣府から特区採択の知らせが届きました。このまま順調に行けば、最速で現在の1年次生が来年度に編入学試験を受験し、合格すれば編入学できる可能性が出てきました。また、この制度は工科短期大学校の既卒者にも適用されますので、工科短大および南信工短を卒業し、企業等で活躍中の卒業生で、実戦経験を積んだ上でもう一度大学において工学の基礎理論や先端研究を学び直したい既卒者の方にも編入学の道が拓かれました。

しかしながら、職能短大から大学への編入学にはまだ多くの課題が残されています。ほとんどの職能短大では専門科目の選択科目は2年間で1~2単位程度しか開講されていません。さらに、人文科学分野と社会科学分野の一般教養科目は数科目しか開講されていません。したがって、編入学後に大学において専門科目中心に「既修得単位認定」を行っても職能短大からの編入生が幅広い学問領域もカバーするように設定された大学の卒業要件（卒業に必要な授業科目の単位数の取得）、特に教養科目を残りの2年間で満たすこと

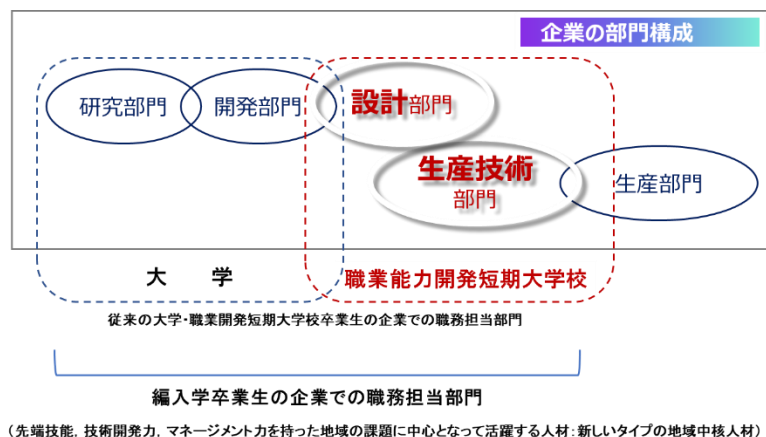


図2 編入学卒業生の職場における担当部門の概念図

は至難の業です。そこで、職能短大に在学中に他の大学や短期大学の授業を受講し取得した単位を職能短大の単位として認定してもらうことができればこの科目も既修得単位の対象となります。この大学との「単位互換制度」の合意も不可欠です。こちらも早急に進める必要がありますが、幸い信州大学の関係学部（工学部、繊維学部、農学部及び理学部）及び諏訪東京理科大学との間で学術協定を締結しましたので、締結した協定に則って単位互換制度と既修得単位認定についても検討していただけることになりました。

3.3 カリキュラムの改編

一方で職能短大のカリキュラムの改編も不可欠です。南信工短では専門必修科目の授業時間数を本校の開学の理念と目的を維持できる範囲内でできるだけ減らして、それにより生じた時間を専門分野と人文社会分野の選択科目に充てるカリキュラムの再編成を検討し始めました。また、現在 100 分授業となっている 1 コマの授業時間数も大学と同じ 90 分とすれば、学生の自主的な学習時間に充てることができます。さらには、前述のように授業内容についても大学の対応する授業の内容を参考に再検討する必要があります。大学教員や高校の担当教諭を交えてた場に編入学生向けのカリキュラムの叩き台を提示させていただき検討を重ねてゆきたいと考えています。

ところで、この法律は特区内でしか適用されませんので、本校（南信工短）と上田市の工科短大からは長野県下の大学のみが編入学の対象で他県の大学には編入学試験を受験することすらできません。逆に他県の職能短大の学生が長野県下の大学に編入することも認められていません。構造改革特区に認定された長野県

と熊本県のそれぞれの県内の職能短大に限定された制度です。それでも、この制度は本校や工科短大の在学生や卒業生はもとより地域の高校生にとっては新しいキャリアパスの提案となります。長い目で見れば本校の志願者増にもつながり、将来は地域の発展に寄与できるものと期待しています。ゆくゆくは、特区内に限定されている制度を全国どの大学へも編入学できるように拡充されればと強く期待しています。長野県や熊本県の編入学の実績が全国展開への制度改正に直結すると考えられます。これから解決すべき課題は山積みですが、一つ一つ解決してゆきたいと考えています。

3-4 教員の職種

都道府県に勤務する職員は「行政職」、「研究職」及び「教育職」に大きく分類されます。高等教育機関である県立の大学における教員は「教育職」であり、また、研究機関である県立の工業技術総合センター等の研究機関の技術職員は「研究職」になっています。

一方、職能短大に勤務する教員（教授、准教授、講師、助教、助手）の職種は「行政職」となっています。職能短大における教員の業務は、「教育」・「研究」・「社会貢献」・「管理運営」であり、実際の業務内容および勤務形態は文部科学省管轄の大学や短期大学の教員とほとんど同じです。文部科学省の大学および短期大学の教員の職種は「教員」となっており、勤務形態は「裁量労働制」が採用されています。実際に職能短大の教員の携わる業務のうち教育（講義、ゼミナール、実験実習及び就活指導）に関するものがそのほとんどを占めます。また、高等教育においてきわめて重要な研究活動（専門分野における学術研究の実施、学会での発表および情報収集、企業や研究機関と

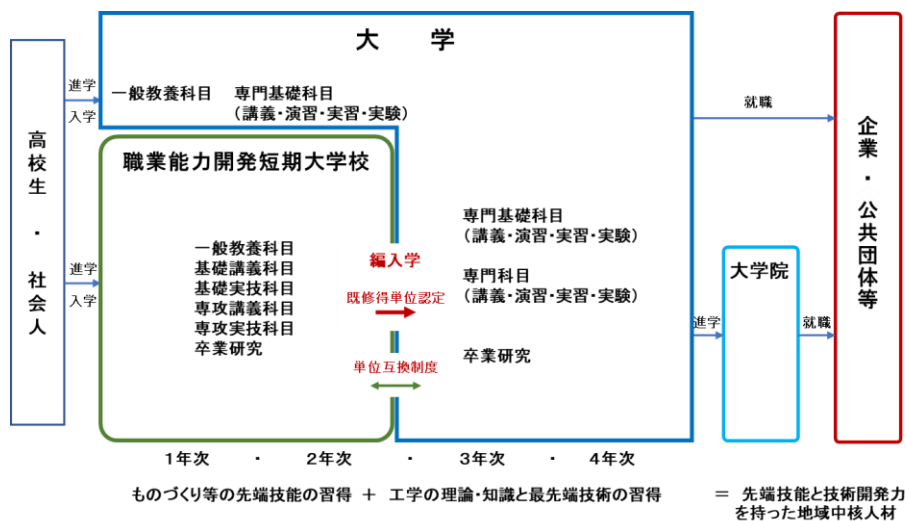


図3 編入学生用のカリキュラムの概念図

の共同研究等)では時間に拘束されない職務形態が不可欠です。このためには、大学や短期大学で採用されている「裁量労働制」が最も適しています。このことから、短期大学校に勤務する教員は文部科学省管轄下の大学や短期大学に勤務する教員と同じく「行政職」よりも「教育職」がふさわしいと考えます。

また、職能短大のかんりの教員は博士の学位を有しています(50%を超える学位取得率の学科も存在します)。また、研究成果の学術雑誌への発表も盛んで、中には科学研究助成金の申請対象研究機関に認定されている職能短大もあります。これらのことから分かるように研究のアクティビティーは十分備わっています。教員の教育力と研究力をより効果的に発揮してもらうためにも、職種を教員と変更し、業務形態も裁量労働制が相応しいと考えています。

また、前述の編入学特区の採択されるための条件のなかに、「職業能力開発短期大学校で実施している教育課程(訓練課程)が文科省法令で定める基準を満たすものに限る」とあります(第十四条)。さらに、「当該校は、文科省法令で定めるところにより、特定高度職業訓練(教育)の実施状況について評価を行い、その結果に基づき当該訓練(教育)の内容その他当該訓練(教育)に関する事項の改善を図るために必要な措置を講ずることにより、当該訓練(教育)水準の向上に努めなければならない」とあります(第十四条の2)⁵⁾。また、編入学に当たっては、両校における既修得単位の編入先での単位読替がどの程度できるかが重要になります。編入先大学ではシラバス等で授業内容を厳密に審査しますが、大学では文科省より教育の質保証を強く求められています。教育課程(訓練課程)を担当するのは当然、職能短大の教員ですが、その教育を担当する教員の職種が「教育職」でないことは、上記の文科省法令に定める基準(設置基準:一クラスの担当教員の能力と数、施設の面積、種類等)との間に違和感があるだけでなく、大学側に対して疑念とまではゆかなくとも疑問を抱かせる可能性があることは否めません。以上、地域の高等教育と先端研究を担う両工科短期大学校の教員としては「教育職がふさわしい職種であると考えます。加えて、編入学制度実質化のためにも職能短大の教員の「教育職」への職種変更が必要と考えます。学校教育法に照らし合わせて条例による改訂が困難な場合は、せめて「研究職」に変えていただけることを要望してゆきたいと考えています。

4. あとがき

本稿では、最初に全国に設置されている文科省以外の省庁管轄の大学校及び短期大学校についてその管轄や学位授与を含めた概要を紹介しました。次に、職業能力開発短期大学校について長野県下の職能短大を例に設立の社会的背景を考察しました。さらに、実施しているカリキュラム(教育課程:授業科目と授業時間数[単位数])を文科省管轄の大学と比較検討しました。最後に今年度から可能になった4年制大学への編入学制度の目的と課題について議論しました。本稿が職業能力開発短期大学校についてより深いご理解と今後の充実発展につながれば幸甚です。(追伸:執筆中に編入試験の合格の知らせが届きました。基礎学力をしっかり身に付けてもらい送り出したいと考えています。)

謝 辞

長野県南信工科短期大学校の設立運営と編入学制度の確立にご尽力いただきました大石修治前校長に感謝申し上げます。岡本正行長野県工科短期大学校長には学校運営についてご指導いただきました。今回の編入学特区にはご一緒に申請させていただきました。心より御礼申し上げます。また、職能短大のカリキュラム編成についてご教示いただきました尾原祐三熊本県立技術短期大学校長に感謝申し上げます。

参 考 文 献

1. 「長野県南信工科短期大学校から大学への編入学」 武田三男 信州大学理学部同窓会報(2023).
2. 「職業能力開発短期大学校とテクニシャン養成」 永田萬享 産業教育学研究 30巻2号p51(2000).
3. 文部科学省告示第123号 平成26年9月1日(2014).
4. 「職業能力開発短期大学校における訓練時間制度の現状と課題 ―大学設置基準による大学における単位制度との比較による―」 尾原祐三 令和2年度県立職業能力開発短期大学校長会議資料(2020).
5. 「構造改革特別区域法の一部を改正する法案」 第208回国会(通常)第27号(内閣府提出), 5月25日参議院可決成立(2022).
6. 「職業能力開発短期大学校の修了者の大学編入学事業」 第58回構造改革特別区域計画の認定について 内閣府地方創生推進事務局HP, 令和5年1月5日(2023).

【事例紹介】

南箕輪小学校 6 年 1 組とコラボしたイルミネーションの製作

電気システム学科 柳沢裕二

1. はじめに

地元の南箕輪小学校とはこれまでも、学校見学や地域を題材にしたすごろくづくりなどで交流があり、2023 年度も 6 年 1 組とコラボレーションしてものづくり体験がしたいと要望があった。あまり多くの日数を確保できないという事情もあり、半日の体験授業を 2、3 回程度で完結可能なテーマを探した。その中で、毎年 10 月に地元で開催される大芝高原イルミネーションフェスティバルに着目し、そこで展示するイルミネーション装置を製作することとなった。

2. 製作品概要

装置の中心となる点滅部分については、無安定マルチバイブレータによる LED 点滅回路を一人につき一つずつはんだ付けで製作してもらうこととした。理由としては以下のようなものがあげられる。

- 全員の作品を同時に展示できる大きさ
- 電源を入れるだけでの点滅
- 屋外に 1 か月間展示するに足る頑丈さ
- 初心者でも短時間で組み立てられる部品数
- 電子部品を製造している地元企業の存在

さらに、プラスチックコップに各々が好きに絵を描いてオリジナルランプシェードを作製し、LED 点滅回路にかぶせて LED ランタンとした。これらを透明なビニール袋に収納し防雨対策とした。

このように製作した人数分の LED ランタンを、高さ 2 メートルほどのフラワースタンドに鈴なりに吊るし、一つのイルミネーション装置とした (図 1)。

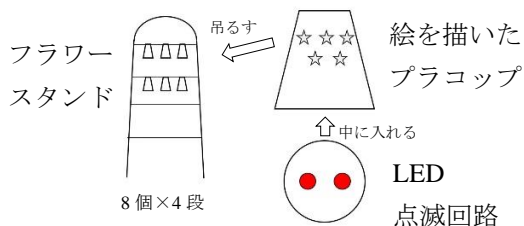


図 1. 製作品概要図

3.1 基板設計・製作

無安定マルチバイブレータ回路は、電子 CAD の実習で題材にしたこともあることから、その時の回路を応用し設計を行った。

LED は多彩な色となるように、OptoSupply 社の 12 色の高輝度パステルカラー LED (OSB64L5111A 他) を用いた。この LED の順方向電圧 V_f は 3.1[V] であるため、イルミネーションフェスティバル当日は DC5.0[V] 出力の AC アダプタで駆動させることとした。また、展示終了後は家に持ち帰って飾りたいという要望があったため、乾電池 3 本で駆動させることも想定し部品を選定した。

基板については、プラスチックコップ内に着脱できるように直径 60[mm] の円形の一部分が欠けた形状とし、当校の設備基板を自作することとした。回路設計・基板設計には Quadcept を、基板加工には LPKF ProtomatS63 を用いた。はんだ付け初心者でも失敗を減らせるように、パッドをわずかに大きく作成し、パッドとベタとの間の絶縁幅も普段の倍程度とし、はんだブリッジが起りにくいようにした。パッドの周囲により大きな絶縁領域をとることも考えたが、基板加工機の工具の消耗が激しいため断念した。このように設計した基板で図 2 のように試作し動作を確認した。

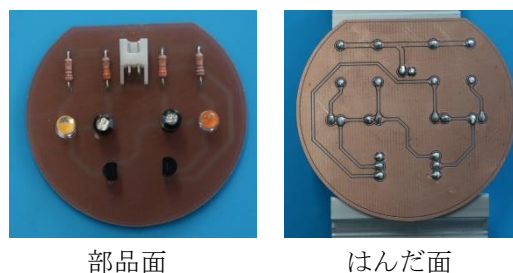


図 2. LED 点滅回路製作例

試作品で動作確認後、本短期大学の在庫を有効活用しつつ、表 1 の材料を予備や学生練習用を含めて、56 セット分用意した。

表 1. マルチバイブレータ材料

部品名	仕様等	数量
プリント基板	φ60 片面、自作	1
炭素被膜抵抗	100Ω	2
炭素被膜抵抗	33kΩ	2
電解コンデンサ	33μF	2
LED	OSB64L5111A 他	2
トランジスタ	2SC1815(GR)	2
コネクタ	S2B-XH-A	1

3.2 回路組み立て作業

8月28日、29日の午前中2回は、当校ではんだ付けによる回路作製を行った。

小学生のほとんどがはんだ付け初心者であったため、電気システム学科2年生全員に指導役をお願いし、人数比から学生1名につき児童2名ずつ担当してもらうこととした。しかし、当校の学生もはんだ付けに熟達しているわけではないので、児童2名の同時作業は目が届かないと考え、学生1名につきはんだごて1台を割り当てた。2名の児童には1台を交互に使ってもらうことで、作業中は学生が常に児童1名を見ていられるようにした。会場には表2のものを準備し1テーブルに学生1名、児童2名が座るようにした。

表 2. 会場に用意したもの

物品	数量	型番、用途
本番用材料	児童1人に1つ	表1のもの
練習用材料	児童1人に1つ	練習用基板抵抗
はんだごて	テーブルに1つ	HAKKO FX951+FM2028
吸煙器	テーブルに1つ	HAKKO FA-400
耐熱マット	テーブルに1つ	
マイクロニッパ	テーブルに1つ	
ラジオペンチ	テーブルに1つ	
卓上箒	テーブルに1つ	
保護メガネ	テーブルに1つ	
タブレット	テーブルに1つ	資料閲覧用
はんだ	会場に2巻	HAKKO FS501-01
はんだ吸い取り器	会場に3つ	回路補修用
直流安定化電源	会場に2つ	回路試運転用
ブレッドボード	会場に3つ	LED色確認用
テスタ	会場に5つ	回路確認用
絶縁スプレー	会場に3つ	
応急箱	会場に1つ	

実習に先立ち、電気回路の基礎の座学を行った。材

料を1つ1つ手に取りながら、材料の名前、役割、形を確認した。特に、抵抗器以外は向きを間違えると動作しないため、手で触りながら確認した。また、このうちのいくつかは地元の企業で作られていることも説明した。

次にはんだ付けの説明と実演を行い、作業にあたっての注意事項を繰り返し伝え、練習用材料ではんだ付けの練習を行った。はんだ付け作業時は、図3のように児童1名につき学生か教員が1名つくようにし、危険作業の注意、作業のアドバイス、出来栄の評価を行った。



図 3. 学生1名、児童2名によるはんだ付け作業

はんだ付けははじめての児童ばかりだったが、素直で飲み込みがよく、きちんとはんだ付けができていた。また、ふざけて危険行為をする者もおらず、怪我なく練習を終えることができた。しかし、こちらで用意した保護メガネが子供達には大きすぎてずり落ちてしまうことがしばしばあったので、2日目からは小学校の理科室で使っている保護メガネを持ってきてもらうこととした。

続いて、実際の基板へのはんだ付けを行った。はじめに、はんだ付けしやすい抵抗から取り付けたこともあり、想像以上にスムーズに作業は進んでいた。ブリッジなどはんだ付けを失敗してしまった一部のものについては、学生と教員がはんだ吸い取り器を用いて個別にリペアを行った。1日目は抵抗4本とコネクタ1つを取り付けて終了した。

2日目は続きということで、LED、コンデンサ、トランジスタのはんだ付け作業を行った。すべての部品のはんだ付けが完了した回路については、学生がテスタで簡単なチェックをした後で図4のように直流安定化電源により試運転を行った。12色のLEDの色がば

らせるようにランダムに配布したため、自分の回路が何色に光るかにも一喜一憂していた。



図 4. 試運転を見守る児童たち

うまく動作しない回路も少数あったが、それらの回路は教員がリペアを行った。怪我や材料の破損はなく、簡単なリペアで済む程度のミスだけで全員分の回路が完成し、予定時間より早く回路組み立て作業が完了した。

終了時間まで 1 時間程度の時間ができたので、裏面に絶縁スプレーを 2 回塗布する作業も行った。スプレーが乾燥するまでの待ち時間は長めの休憩時間としたが、図 5 のように児童と学生が交流する時間になっていたようだった。



図 5. 学生と児童の交流

この日は基板の製作のみとし、プラスチックコップを用いたランプシェードは、小学校内で製作してもらうこととした。

3.3 飾りつけ

ランプシェードが完成したとの連絡を受け、9 月 27 日に、学生 5 名と教員 3 名の 8 人で南箕輪小学校を訪問し、児童とともに飾りつけをした。

図 6 のように電線を付けた LED 点滅回路を、オリジナルランプシェードにはめ込み、透明なビニール袋に入れて封をし、図 7 のようにフラワースタンドに吊るしていった。電線はフラワースタンドの柱の部分に

結束バンドとスパイラルチューブで固定と保護をし、フラワースタンド下部に設置した防雨ボックスに入れた電源分岐基板へとつなげた。

一度に 32 人分の回路を点灯させる実験はしていなかったのが正常に動作するか不安であったが、飾りつけ後に電源を入れると全員の回路が正常に点灯した。市販の LED ロープライトほど明るくはないため部屋が明るいと目立たないが、部屋を暗くすると LED とランプシェードのデコレーションにより非常にカラフルに点灯する様子を確認できた。



図 6. ランプシェードの組立て



図 7. スタンドへの飾りつけ

3.4 展示

10 月 4 日に会場の信州大芝高原への設営を行い、10 月 7 日 17 時に大芝高原イルミネーションフェスティバルの初点灯が行われた。公園内のイルミネーションが順番に点灯していく中で、自分たちの作品が無事点灯すると歓声と安堵の声が漏れた。この日の 17 時はま

だ明るかったため、周りのイルミネーションに比べると明るさが足りなく感じたが、30 分程度経過し周囲が十分暗くなると、図 8 のようにとても鮮やかに点灯していた。



図 8. 展示中のイルミネーション装置

参考文献

- 1). 中島一雄：南箕輪小学校 6 年生 1 組と機械システム学科 2 年生との共同実習について－南箕輪村紹介ボードゲーム製作－；長野県南信工科短期大学校紀要,7,42-44(2023)

4. まとめ

無安定マルチバイブレータは実習の教材にしたり、小学生向けのものづくり教室でブレッドボード上に組み立てたりしたことは過去にもあった。しかし、小学生にはんだ付けで組み立ててもらうことは初めてだったので、怪我がなくできるのかが一番心配であった。しかし、学生がきちんと目を配ってフォローしてくれたおかげで、誰も怪我することがなくきちんと動く回路を全員が製作することができた。当日サポートしてくれた電気システム学科 2 年生にはこの場を借りて謝意を述べさせていただきたい。

児童からは「最初難しかったけど、やっていくうちにコツがわかって楽しかった」、学生からは「子供たちに教える過程で自分の我流でやっていた部分がわかった」というような感想をもらい、児童だけでなく学生たちにも良い経験になった。

【事例紹介】

伊那弥生ヶ丘高校の「総合的な探究の時間」 ーコミュニケーションデザインを学ぶー

機械システム学科 鮎沢俊輔

1. まえがき

高等学校のカリキュラムでは探究学習科目「総合的な探究の時間」が実施されている。これは、探究の見方や考え方を働かせて、課題を発見し解決していくための知識・能力を育成することを目標に掲げている。学校の外の人に学び、地域のこれからのを考えていく授業である。伊那弥生ヶ丘高校で行われている探究の授業において、コミュニケーションデザインをテーマに、南信工科短期大学校を題材として取り上げていただいた。発信者・受信者・情報提供者のコミュニケーションをデザインしながら、情報発信を行なっていくことを探究した。1年生の生徒23名が、1年生200名全員に長野県南信工科短期大学校を伝えていくために、何を、どのツールで、どうやって伝えていくかを考え、実行した。また、アンケートを合わせて実施し、どれくらい認知度が広がったか調査した。なお、本プログラムは上伊那産業振興会からの発注を受けて株式会社ローカルライフが実施した。

2. 実施内容

まず初めに、伊那弥生ヶ丘高校1年生全員をターゲットに事前アンケートを行った。その後、全3回にわたる南信工科短期大学校の取材を実施した。取材の様子を図1に示す。



図1 南信工科短期大学校の取材の様子

高校では、1年生全員への周知活動を実施した。周知

活動には高校内連絡専用アプリ、クラス新聞やSNS等を利用した。最後に、事後アンケートを実施して、調査結果をまとめた。アンケートは南信工科短期大学校をどの程度知っているか問う内容であった。事前アンケート結果を図2に、事後アンケート結果を図3に示す。

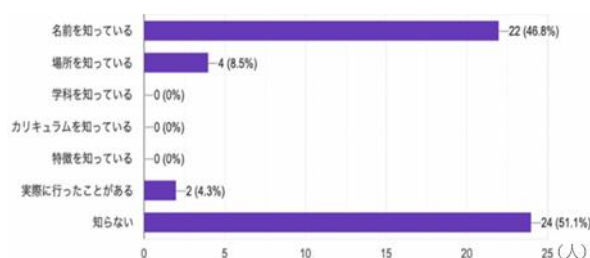


図1 事前アンケート結果

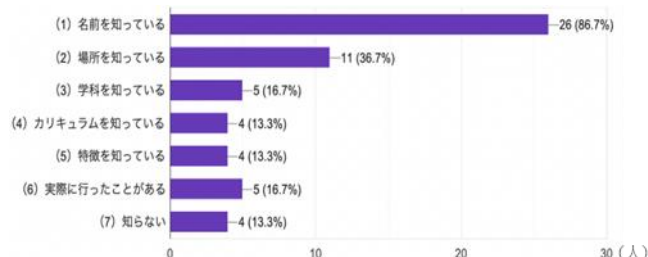


図2 事後アンケート結果

活動前は長野県南信工科短期大学校を「知らない」と回答した割合は半数以上で、「学科を知っている」、「カリキュラムを知っている」、「特徴を知っている」と回答した割合は0%であった。これに対し活動後は、「知らない」と回答した割合は13.3%まで減少し、「学科を知っている」、「カリキュラムを知っている」、「特徴を知っている」は1割を超える結果となった。伊那弥生ヶ丘高校1年生への長野県南信工科短期大学校認知度アップとして一定の効果があったものと考えられる。

3. むすび

長野県南信工科短期大学校認知度アップという有意義な活動をしていただいた株式会社ローカルライフと上伊那産業振興会に謝意を表す。

研究・教育・社会活動の概要

(2023.4.1～2024.3.31)

A. 研究活動

1. 研究論文・解説・技術資料等

Shunsuke AYUZAWA, Tetsuya YAMADA, Hiroh MIYAGAWA, Shuji OISHI, Katsuya TESHIMA,
Low-temperature Ruby Crystal Growth Via a Supersaturation Process Based on Flux Decomposition,
Small, 20, Issue 18, 202308047, 2024.

中山 昇, 榊 和彦, 松原洋一, 片寄眞也, 露口 諒, 和田光史
酸化剤供給システムとバルブシステムを搭載したハイブリッドロケットの開発
日本機械学会 2023 年度年次大会, 2023, S191-02, 2023.

武田三男, 中田陽介, 千葉 永, 宮丸文章
H 字型強誘電体導波管における EPSILON NEAR ZERO トンネリング現象の数値解析
長野県南信工科短期大学校紀要, 7, 2-9, 2023.

松原洋一
ハイブリッドロケット用テレメトリユニットの開発
長野県南信工科短期大学校紀要, 7, 10-15, 2023.

小林義和
金型表面の微細テクスチャによる射出成形における樹脂流れの制御
長野県南信工科短期大学校紀要, 7, 16-20, 2023.

工藤賢一, 垣内健児
一方向凝固による $\text{Ca}_3\text{NbGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ の晶出
長野県南信工科短期大学校紀要, 7, 21-24, 2023.

柳沢裕二
2022 年度総合課題の取組み
長野県南信工科短期大学校紀要, 7, 25-29, 2023.

武久泰夫
畳み込みニューラルネットワーク超解像の端緒論文を読む
長野県南信工科短期大学校紀要, 7, 30-34, 2023.

南澤壮和
編入に向けた試験問題の分析
長野県南信工科短期大学校紀要, 7, 35-41, 2023.

中島一雄
南箕輪小学校 6 年 1 組と機械システム学科 2 年生との共同実習について —南箕輪村紹介ボードゲーム製作—

長野県南信工科短期大学校紀要, 7, 42-44, 2023.

中島一雄

南箕輪小学校 4 年生のトレジャータイムへの協力について ―ものづくり教室の実施―
長野県南信工科短期大学校紀要, 7, 45-47, 2023.

中島一雄

科学ふれあいフェア 2022 「デザインコンクール」の実施について
長野県南信工科短期大学校紀要, 7, 48-49, 2023.

鮎沢俊輔

伊那弥生ヶ丘高校の「総合的な探究の時間」について ―ものづくりと環境―
長野県南信工科短期大学校紀要, 7, 50-51, 2023.

2. 学会発表

中山 昇, 榎 和彦, 松原洋一, 片寄眞也, 露口 諒, 和田光史

「酸化剤供給システムとバルブシステムを搭載したハイブリッドロケットの開発」
日本機械学会 2023 年度 年次大会, 2022, 9, 4

Ken Okamoto, Hideaki Ishihara, Koichi Morishige

“Cutter location data generation for all types of barrel tool in five-axis machining,”
The Int. Conf. on Leading Edge Manufacturing/Materials & Processing (LEM&P 2023),
New Brunswick, New Jersey, USA, Jun. 2023.

石原秀彬, 岡本 謙, 森重功一

C-Space を用いたテーパバレル工具による 5 軸制御加工の工具経路生成
精密工学会秋季大会学術講演会, 2023 年 9 月

岡本 謙, 石原秀彬, 森重功一

特殊工具を用いた 5 軸制御加工のための C-Space に基づいた工具経路生成
型技術ワークショップ in SUWA, 2023 年 11 月.

3. 特許・発明

中島一雄

特許出願中 【発明の名称】 「成型型の製造法」 デジタルモールド粉末冶金
有限会社スワニー 橋爪良博
ナパック株式会社 鈴木 隆

4. 共同研究

武田三男

テラヘルツ時間領域分光法による複素誘電関数の決定と電磁波分散関係の導出
福井大学・遠赤外領域開発センター 北原英明

武田三男

強誘電体による Epsilon Near Zero トンネリング現象の研究

信州大学・大学院総合医理工学研究科（理学部） 宮丸文章,
大阪大学・大学院基礎工学研究科（基礎工学部） 中田陽介

武田三男

テラヘルツ時間領域分光法によるフォトニック結晶およびメタマテリアルによる電磁波伝播特性制御
香港科技大學（廣州）・功能樞紐先進材料學域 Weijia WEN

中島一雄

アカマツ経木の接着と立体造形活用
株式会社やまとわ

中島一雄

3D プリント応用技術「デジタルモールド粉末冶金技術」
有限会社スワニー, ナパック株式会社, サン工業

中島一雄

レアメタルの切削切屑を再利用した装飾品材料の開発
有限会社SORA

岡本 謙

異形工具を用いた 5 軸制御加工のためのコンフィギュレーション空間に基づいた工具経路生成に関する研究
電気通信大学大学院情報理工学研究科 森重功一

B. 教育活動

1. 授業担当

武田三男	社会学 ゲスト講師として、栗田秀實氏（自然調和技術研究所）、高坂一幸（アルプス中央信用金庫）、伊藤憲明（南信工科短大振興会）、ならびに酒井崇氏（JAICA）に専門分野の講義を担当していただいた。
武久泰夫	電磁気学 電磁気学では、物理現象は数式によって表現できることを実感してもらえよう、身近な現象と数式を対応させて説明するように心がけた。また、常に単位系に気を配るよう指導した。
工藤賢一	機械材料、機械加工学Ⅱ、制御工学概論、材料、機械工学概論
荒川 進	制御工学概論、安全衛生工学、機械工学Ⅱ、油圧・空圧制御、安全衛生作業法、機械加工実習Ⅰ、制御工学実習Ⅱ、測定工学実習、ゼミナール、総合課題、機械工作法
中島一雄	物理学、機械工学基礎実験Ⅱ、機械加工実習Ⅲ、制御工学実習Ⅲ、測定工学実習、設計製図実習Ⅱ・Ⅲ、ゼミナール、総合課題、NC 工作概論、NC プログラミング実習、生産工学概論
小林義和	力学演習、基礎製図、情報処理実習、ゼミナール、総合課題、応用数学、機械工学概論
矢崎美彦	制御工学概論、熱力学、機械工学Ⅰ、数値制御Ⅰ、機械工学基礎実験Ⅰ・Ⅱ、機械加工実習Ⅰ・Ⅱ・Ⅳ、制御工学実習Ⅰ・Ⅱ・Ⅲ、測定工学実習、ゼミナール、総合課題、切削加工法及び研削加工法

鮎沢俊輔	制御工学概論, 油圧・空圧制御, 機械工学基礎実験Ⅱ, 機械加工実習Ⅲ・Ⅳ, 測定工学実習, ゼミナール, 総合課題, 測定及びけがき実習, NC工作概論, NCプログラミング実習,
岡本 謙	基礎製図, 数値制御Ⅱ, 機械工学基礎実験Ⅰ, 情報処理実習, 測定工学実習, 機械加工実習Ⅰ・Ⅲ, 制御工学実習Ⅱ・Ⅲ, ゼミナール, 総合課題, 切削加工法及び研削加工法, コンピュータ操作基本実習
松原洋一	情報通信概論, 安全衛生工学, 情報通信基礎実習, ゼミナール, 総合課題, 自動制御実習, 機械制御, FAシステム構築実習Ⅱ, データサイエンス概論, 制御プログラミング基礎実習 FAシステム構築実習Ⅱは, 画像処理実習機等を用い, 光学系の基本から画像処理の基礎知識までの授業を行った。PLCとの連携を行いより実践的な授業に取り組んだ。
木下昌信	シーケンス制御実習Ⅰ・Ⅱ, 機械電気製図, 制御プログラミング基礎実習, インターフェース技術, 制御プログラミング実習Ⅱ, 機械工作実習, 機械制御Ⅱ, 総合課題
倉澤勝美	電子デバイス, 制御工学Ⅰ・Ⅱ, 環境システム技術, 制御工学演習, 自動制御Ⅱ, 電気機器, デジタル回路基礎実験Ⅰ・Ⅱ, 電気機器実験, 総合課題
柳沢裕二	シーケンス制御, 電気工学基礎実験, 機械制御実習Ⅰ・Ⅱ, 機械制御Ⅰ・Ⅱ, 自動制御実習, FAシステム構築実習Ⅰ, 総合課題
南澤壮和	電気回路, 電磁気学, 安全衛生作業法, ゼミナール, 総合課題
浅沼和志	生産工学, 流体工学, 電気工学概論
池田治人	シーケンス制御, 制御工学実習Ⅰ
伊藤彰規	シーケンス制御実習Ⅰ, 機械制御Ⅱ
大林徹也	FAシステム構築実習Ⅰ・Ⅱ
小沢益也, 藤森直樹	知的財産権
北原泰邦	日本語表現
五味久幸	製図, 製図基本実習, 材料力学, 機械制御Ⅰ
新聞寛之	製図基本実習
戸田明彦	基礎数学, 解析学概論
土橋美博	機械設計製図Ⅰ, 設計製図実習Ⅰ・Ⅲ
中村秋男	環境エネルギー有効利用実習
西山隆也	電子デバイス基礎実験, アナログ回路基礎実験, 情報工学概論, 電気工学概論, 電気工学基礎実験, 情報通信基礎実習
藤崎淳子	設計製図実習Ⅱ
藤原政治	機械加工実習Ⅰ, 機械加工実習
松崎 旻	体育Ⅰ・Ⅱ
三沢雅芳	環境エネルギー概論, 環境エネルギー実習
御子柴孝	計測センシング

矢島幸治	測定工学, 機械加工実習 I・II, 測定法, 機械加工実習, 切削加工及び切削加工実習
横道正和	材料力学 I・II, 機械加工学 I, 機械工学基礎実験 I, 機械制御 I
リアナ・ジョセフ	英語 I・II

2. 卒業論文

伊澤頼寿	マレットゴルフ用スティックの打撃音の評価	矢崎美彦 (機械システム学科)
榎本圭市	歩行補助装置の設計開発 (下半身不随障害者リハビリ用)	中島一雄 (機械システム学科)
大川敦也	マレットゴルフ用スティックの設計 ～ホーゼル部の形状とシャフトの変形量との関係～	矢崎美彦 (機械システム学科)
大川千路	水田除草のための土壌攪拌農具の提案	荒川 進 (機械システム学科)
川上胡瞳	手動作姿勢で生じる生体信号の特徴付け	荒川 進 (機械システム学科)
久保田大智	3D パズルの製作	小林義和 (機械システム学科)
倉田悠太郎	次世代モビリティ社会を見据えた運転シミュレータの 開発 ～陸空両用車両のシミュレーション～	岡本 謙 (機械システム学科)
佐々木太一	デジタルモールド粉末冶金製金型の粉体圧縮工程の離 型に関する研究	中島一雄 (機械システム学科)
洲原珠唯	デジタルモールド粉末冶金の材料とめっき技術の応用 に関する研究	中島一雄 (機械システム学科)
西澤輝泰	搬送能力を有した球殻ロボットの開発	工藤賢一, 鮎沢俊輔 (機械シス テム学科)
原 史弥	マレットゴルフ用スティックの設計 ～構造最適化設計によるヘッド部の設計～	矢崎美彦 (機械システム学科)
山口 将	教材の開発 ～ものづくりに興味をもってもらうきっかけづくり～	工藤賢一, 鮎沢俊輔 (機械シス テム学科)
山口 蓮	移動式ロボットの開発環境の構築	工藤賢一, 鮎沢俊輔 (機械シス テム学科)
望月秀斗	移動式ロボットの動きの高精度化	工藤賢一, 鮎沢俊輔 (機械シス テム学科)
有賀太一	ラダーコンパイラの研究	柳沢裕二 (電気システム学科)
稲田爽太郎	ロボットで活用する画像処理システムの開発PART1	木下昌信 (電気システム学科)
今井晴基	校内 3D マップ作製	倉澤勝美 (電気システム学科)
北澤 訓	AI を用いたアスパラガス認識についての研究	松原洋一 (電気システム学科)
木村圭史	アスパラガス収穫機を夜間運用するためのコード識別 についての研究	松原洋一 (電気システム学科)
小町谷樹	AI を用いたテニスの勝敗予想	武久泰夫 (電気システム学科)

小松賢史郎	小型マイコンを使ったグローブ型コントローラの開発	南澤壯和（電気システム学科）
酒井幸志朗	アスパラガス収穫機に搭載可能な支柱検知レーダの研究	松原洋一（電気システム学科）
柴田一輝	顎部筋電位の活用についての研究	南澤壯和（電気システム学科）
登内翔也	マイコン内蔵 LED を利用した表示装置の開発	倉澤勝美（電気システム学科）
中澤達也	9 軸センサを用いた姿勢情報取得の研究	倉澤勝美（電気システム学科）
中島伊吹	産業用ロボットで活用する画像処理システムの開発 PART2	木下昌信（電気システム学科）
桃澤知也	駐車場監視システムに関する研究	柳沢裕二（電気システム学科）
守屋花香	トランジスタ回路に関する設計・実習教材の開発	倉澤勝美（電気システム学科）
山本イケン ナ	画像処理を用いた在庫管理システム	武久泰夫（電気システム学科）
小林隆斗	AI による人間の老化の見え方 AI による音楽の生成過程についての研究	松原洋一（電気システム学科）

3. 課外活動

松原洋一

伊那市露地野菜コンソーシアムにおいて、アスパラガス収穫機の開発に参加し、主に認識部の開発に携わった。

松原洋一

SUWA 小型ロケットプロジェクトにメンバーとして参加し、バルブシステムを用いたロケット開発、無線を使った遠隔点火システムの開発に携わった。

松原洋一

駒ヶ根市東伊那公民館のデジタルアーカイブ事業に協力し、古文書のデジタル化に携わった。

中島一雄，鮎沢俊輔，南澤壯和

伊那弥生ヶ丘高校の「総合的な探究の授業」で「コミュニケーションデザイン」をテーマとして合計 3 回の授業を実施した。

中島一雄

南箕輪村立南箕輪小学校 4 年 1 組の「トレジャータイムの授業」で児童に対し、「ものづくり教室」を合計 3 回担当した。

岡本 謙

伊那市によるドローン物流システムについて、機械システム学科および電気システム学科の学生と視察した。

4. 学生の活動

電気システム学科 1 年生 矢野雅也

ロボットアイデア甲子園甲信越大会出場

2023.10.21

南箕輪村小学校 6年1組と共同でのものづくり

LED ランタンづくり・大芝高原イルミネーションフェスティバル出展

C. 社会活動

1. 役員

1) 学会役員等

小林義和

公益社団法人精密工学会 校閲委員会協力委員

2009 - 現在

小林義和

公益社団法人日本設計工学会 出版部会校閲委員会委員（幹事）

2010 - 現在

2) 地域および国等での委員等

武田三男

香港科技大学（廣州） 兼任教授

2022.7 - 2023.3

武田三男

信州大学 特任教授

2016.4 - 2024.3

武田三男

信州大学大学院総合医理工学研究科 ゲスト講師（先鋭領域融合研究群先端研究特講）

2021.4 - 2024.3

武田三男

諏訪広域公立大学事務組合公立大学法人評価委員会 委員

2022.6 - 2024.3

武田三男

駒ヶ根市「新製品・新技術開発支援事業補助金」 審査員

2021.6 - 2024.3

武田三男

信州大学理学部同窓会 副会長，信州大学理学部物理同窓会 顧問

2015.4 - 2024.3

武久泰夫

長野県駒ヶ根工業高等学校 評議員

2018.4 - 2024.3

武久泰夫
伊那市新産業技術推進協議会委員ならびにスマート工業部会長
2019.5 - 2024.3

武久泰夫
箕輪町「新技術及び新製品開発事業補助金」 審査委員長
2018.4 - 2024.3

武久泰夫
駒ヶ根市雇用対策協議会 委員
2018.4 - 2024.3

武久泰夫
長野県産業人材育成支援ネットワーク会議 委員
2018.4 - 2024.3

武久泰夫
上伊那総合技術新校再編実施計画懇話会 構成員
2021.11 - 2024.3

荒川 進
南箕輪村教育連携協議会 委員
2022.7 - 現在

松原洋一
長野県赤穂総合学科新校準備委員会 委員
2022.4 - 現在

松原洋一・荒川 進
伊那市スマート農業専門委員会 委員
2023.6 - 現在

2. 対外的活動

1) 国・県、地域等での活動

柳沢裕二
宮田村公民館講座
「プログラミング講座」
2023.7.28, 農業者トレーニングセンター (宮田村)

工藤賢一, 岡本 謙
東伊那公民館講座
「ドローンのプログラミング実習」
2023.7.31～8.1 東伊那公民館 (駒ヶ根市)

岡本 謙

小中養護学校の教職員を対象とした講習会

「ICT活用教育研修会 I ドローンのプログラミング・操作体験会」

2023.9.5

倉澤勝美、柳沢裕二

伊那市・公益財団法人上伊那産業振興会共催事業「IoT 導入人材育成講座」

「IoT ツール実習研修」

2023.10.31-11.28, 産業と若者が息づく拠点施設 allia (アルラ) (伊那市)

柳沢裕二

技能検定 シーケンス制御検定員

2024.1.6 - 7, 松本ポリテクセンター (松本市)

中島一雄

技能検定 機械検査検定員

2024.2.9 - 11, 松本ポリテクセンター (松本市)

2) 会員

一般社団法人信州産学みらい共創会 賛助会員

伊那谷アグリイノベーション推進機構

一般財団法人 AREC 賛助会員

長野県産業人材育成支援ネットワーク会議

3) 研究・教育相談

中島一雄

技能検定に関わる技術相談

2022.6 - 2022.11

株式会社エグロ, 株式会社 IHI エアロマニュファクチャリング

D. 研究助成

小林義和

3D プリント造形における製品内部設計手法の提案と CAD 開発

科学研究費助成事業 (科研費) 基盤研究 (C)

直接経費 110 万円 間接経費 33 万円

鮎沢俊輔

フラックス法によるルビー結晶の低温成長に関する研究

令和 5 年度南信工科短大振興会研究補助金

20 万円

岡本 謙

バレル工具を用いた高能率曲面加工のためのソフトウェア基盤技術開発

令和5年度南信工科短大振興会研究補助金

20万円

岡本 謙

Cutter Location Data Generation for All Types of Barrel Tool in Five-Axis Machining

公益財団法人工作機械技術振興財団 海外国際会議参加支援

35万円

編 集 後 記

多くの皆様のご尽力によりまして、長野県南信工科短期大学校紀要第8号が発刊されました。フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』によりますと、紀要とは、「大学（短期大学を含む）などの教育機関や各種の研究所・博物館などが定期的に発行する学術雑誌のことである」と説明されています。巻頭言にも述べていますとおり、本紀要の目的は、本校の教職員が行った研究・教育・社会活動等の取組とその成果を公表し、本校の活動をご理解いただくことです。従いまして、紀要の内容は主には原著論文や解説ですが、これに加えて、本校が目指す「教育・研究・地域貢献」の具現化の試みや、特徴的な取組みであります「総合課題」及び「卒業研究」についての考査などが、創刊以来、数多く掲載されてきました。引き続き、本紀要によって、本校の生き生きとした活動の気配を感じ取っていただければ幸いです。

紀要委員会 主任 工藤 賢一

2024年度	紀要委員会
委員長	武田 三男
委員	久保田和彦
	小林 義和
	松原 洋一
主任	工藤 賢一

長野県南信工科短期大学校紀要 第8号 2024

令和7年2月26日 印刷

令和7年2月28日 発行

編集 長野県南信工科短期大学校 紀要委員会

発行者 長野県南信工科短期大学校

〒399-4511 長野県上伊那郡南箕輪村 8304-190

TEL 0265-71-5051 FAX 0265-72-2064

印刷所 株式会社 宮 澤 印 刷

〒399-4117 長野県駒ヶ根市赤穂 4295 番地

TEL 0265-82-2571
