
長野県南信工科短期大学校

紀 要

第 9 号

2025



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9号 2025

目次

巻頭言

紀要第9号の発刊	武田三男	1
----------	------	---

論文・解説

夜間認識可能な3Dコードの研究	松原洋一, 木下想	2
マイコンプログラミングを使用しないLEDのアナログ点灯制御回路の開発	倉澤勝美	6
PLCの短時間プログラミングに関する研究 -Rapidプログラミングの可能性-	清水英孝	10
テクスチャリングされた基板と塗膜の付着性調査	小林義和	13
異形工具に対応したC-Spaceに基づく5軸制御加工のための工具経路生成	岡本 謙, 森重功一	19
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2)	武田三男, 北原英明	26
誘電体結晶における不整合-整合構造相転移の分光学的研究	武田三男	40

技術資料

卒業研究紹介 -3Dパズルの製作-	小林義和	56
オシロスコープによる校章の表示	倉澤勝美	59

事例紹介

2024年度総合課題の取り組み紹介	荒川 進	62
-------------------	------	----

研究・教育・社会活動の概要

		68
--	--	----

編集後記

		78
--	--	----

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

No.9 2025

CONTENTS

Preface	Mitsuo W. TAKEDA	1
Paper • Review		
Research on Nighttime-Recognizable 3D Codes	Yoichi MATSUBARA, So KINOSHITA	2
Development of Analog LED Control Circuit without Microcontroller Programming	Katsumi KURASAWA	6
Study on short time PLC Programming — Possibility of Rapid Programming—	Hidetaka SHIMIZU	10
Adhesion Properties of Coating Films on Textured Metal Sheets	Yoshikazu KOBAYASHI	13
C-Space based Tool Path Generation for 5-Axis Controlled Machining with Variant Shape Tools	Ken OKAMOTO, Koichi MORISHIGE	19
Estimation of Complex Dielectric Function and Derivation of Dispersion Relation of Electromagnetic Wave by using Terahertz Time Domain Spectroscopy (No. 2)	Mitsuo W. TAKEDA, Hideaki KITAHARA	26
Spectroscopic Studies of Incommensurate-Commensurate Structural Phase Transitions in Dielectrics Crystals	Mitsuo W. TAKEDA	40
Technical Report		
Introduction to Graduation Research — 3D Puzzle Fabrication —	Yoshikazu KOBAYASHI	56
Displaying the emblem on an oscilloscope	Katsumi KURASAWA	59
Case Study		
2024 Overall Manufacturing Study	Susumu ARAKAWA	62
Research, Education, and Social Activities		68
Editor's Note		78

巻頭言

紀要第9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、地域産業の課題解決に寄与するため、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います。

本紀要の目的は、本校の教職員が実施した研究・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にあります。昨年度（令和6年度 [2024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、「夜間認識可能な3Dコードの研究」、「マイコンプログラミングを使用しないLEDのアナログ点灯制御回路の開発」および「PLCの短時間プログラミングに関する研究」を掲載しました。解説として「テクスチャリングされた基板と塗装膜の付着性調査」、「異形工具に対応したC-SPACEに基づく5軸制御加工のための工具経路生成」、「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2）」および「誘電体結晶における整合-不整合構造相転移の研究」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」の中から技術資料として参考にしていただきたい取組例をいくつかを選んで紹介します。本号では、卒業研究の中から「卒業研究紹介 -3Dパズルの製作-」、研究活動の中から「オシロスコープによる校章の表示」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。教育活動として、「2024年度総合課題の取り組み紹介」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。

令和5年度からは新型コロナウイルスの感染症分類が5類に変更されたことから、授業等もコロナ禍以前の状況に回復しました。本紀要は、これまでに増して教育・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。特に、教育活動においては令和4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、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。加えて、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。お陰様で、令和6年度は一名の編入学合格者をだすことができました。

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「デジタルエンジニア」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。

夜間認識可能な 3D コードの研究

松原 洋一*, 木下 想**

Research on Nighttime-Recognizable 3D Codes

Yoichi MATSUBARA, So KINOSHITA

あらまし アスパラガス収穫機の夜間運用のため、夜間でも認識できる 3D コードを開発した。2 種類の立体図形を深度カメラで撮像し、得られた深度画像に対して、物体認識アルゴリズムである YOLO による物体検出を行う事で実現できた。実際に収穫機に搭載し夜間運用ができることを確認した。

Summary We developed a 3D code recognizable at night for nighttime operation of the asparagus harvester. Code recognition was achieved by capturing two types of solid figures with a depth camera and performing object detection using YOLO. We confirmed its nighttime operability by installing it on an actual harvester.

Key Words : 3D Code, YOLO, Object detection, Asparagus harvester

1. まえがき

伊那市や近隣企業と共同で、アスパラガス収穫機の開発を行っている。アスパラガス収穫機は、深度カメラを用いて圃場のアスパラガスを認識し、付属のハンドとハサミで収穫する装置である。ハウス内に敷かれたレール上を走行し、アスパラガスの認識と収穫時は停止し、その後一定距離移動してまた認識と収穫を行う動作を繰り返す。

隣接するハウス間も曲線状のレールで接続しており、1 台の収穫機が複数のハウスを収穫することが出来る。ただし、ハウス間のレール上では収穫の必要がない。時間短縮のために、認識時の走行停止動作を行わないことが望ましい。また、収穫すべきハウスを走行した後は、収穫機が自動で停止する必要がある。これらの課題解決のために、ハウスの出口と入口および収穫終了地点に QR コードを取り付けた標識を設置し、深度カメラ付属のカラーカメラを

用いてコードを認識することで、各地点を識別することとした。QR コードを用いた理由は、追加のハードウェアが必要ないという理由からである。

しかし、収穫機が 1 本のアスパラガスを収穫するに要する時間は 15 秒程度であり、人間の作業よりもだいぶ時間がかかる。時間がかかることを補うために、収穫機を夜間から運用する必要が生じた。夜間ではカラーカメラでの QR コードの認識が出来ないため、深度カメラを使ったコード認識を研究する。

2. システム概要

2. 1 3D コードの構成

3D コードとしてイメージ図を Fig. 1 に示す。例えば、左図が「出口」、右図が「入口」のコードとする。複数の立体図形を平板上に設置し、その配置や立体図形の個数でコード認識を行うものである。このように、この方法は複数の立体図形を組み合わせ

受理 2025 年 9 月 30 日
採択 2025 年 11 月 25 日

*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 現 東洋計器株式会社,
松本市

ToyoKeiki Co.,Ltd., Matsumoto, Nagano, Japan

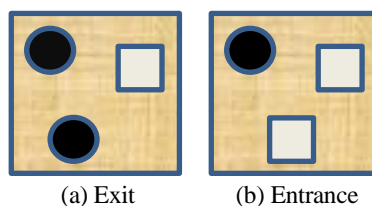


Fig. 1 3D Code Schematic Diagram for exit and entrance

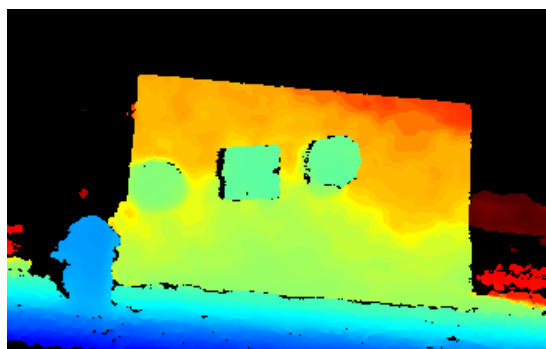


Fig. 2 Image captured by depth camera

ることで、新たなコードを追加することも容易である。

2. 2 立体図形認識システムの構成

立体図形の撮影には、アスパラガス収穫機で使用している深度カメラ [Intel Real Sense D415] を使用する。既に使用しているものであり、追加のハードウェア費用は不要である。Fig. 2 に深度カメラによる画像の例を示す。このカメラは、アクティブステレオカメラであり、被写体に赤外線パターンを照査し、2つのカメラで深度認識を行う物である。赤外線を照射しているため、夜間であっても撮影できる。

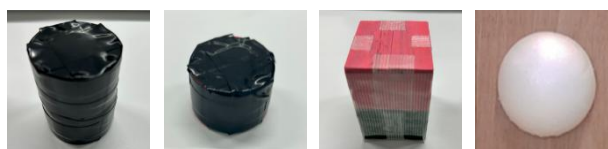
カメラからは、点群データと深度をカラーマッピングした深度画像が得られる。アスパラガスの認識には主として点群データを使用しているが、3D コードの認識にはより簡便に処理できる深度画像を用いることとした。ただし、カメラのデフォルト設定では、カラーマッピング処理ではヒストグラム平滑化が実施されるため、周囲の深度分布により色づけが変わってしまう。これを防ぐため、ヒストグラム平滑化を OFF にし、カラーマップと距離との対応が固定になるように設定した。

立体図形の認識には、AI を用いた物体認識アルゴリズムである YOLOv5 を使用した。YOLOv5 は画像データとラベルデータを用意するだけで学習が行える簡単さと高速で高精度な物体検出が可能なアルゴリズムである。

3. 立体図形の認識

3. 1 立体図形の認識実験

3D コードに使用する立体図形を決定するために Fig. 3 に示す図形を用意した。円柱 (Circle) , 背の低い円



(a) Circle (b) Circle-L (c) Square (d) Sphere

Fig. 3 Solid figures used in the experiment

Table 1 Size of the solid figures used in the experiment

図形種類	寸法(mm)
(a) 円柱 (Circle)	φ40x55(直径 x 高さ)
(b) 低い円柱 (Circle-L)	φ40x27(直径 x 高さ)
(c) 四角柱 (Square)	45x40x57(幅 x 奥行 x 高さ)
(d) 半球 (Sphere)	30(半径)

柱 (Circle-L) , 四角柱 (Square) , 半球 (Sphere) の 4 種類である。また、図形の大きさを Table 1 に示す。これらの 4 つの図形を平板上に固定し、カメラから 1.5m~2.0m の距離に設置し、カメラに正対する角度を 0° とし±20° 角度を付けた画像を 100 枚用意し、学習と検証を行った。学習の際は、1 図形ずつ矩形でラベリングを実施した。

YOLOv5 には *s,m,l,x* の 4 種類のモデルがあるが、今回は、比較的空間分解能が高精度のモデルである *l* モデルを使用した。

3. 2 立体図形の認識結果

学習後のテスト結果を Table 2 に示す。低い円柱 (Circle-L) と半球 (Sphere) には誤認識が比較的多い。どちらも奥行き方向の寸法が小さいため、深度画像で色の違いとして現れにくいことが要因と思われる。

そこで、実際のコードとしては、円柱と四角柱の 2 種類を使うこととした。4 種類の時と同様の条件で 100 枚の画像を撮像し学習を行い、学習結果を用いてテストを行った。テスト結果の画像を Fig. 4 に、テスト結果を Table 3 に示す。1 回のみ図形として認識できない場合があったが、誤認識はなく、比較的安定した認識結果が得られた。

Table 2 Test Results for the solid figures

		Predicted				
		Circle	Circle-L	Square	Sphere	Not detecte
Actual	Circle	22	3	0	0	0
	Circle-L	2	25	0	3	0
	Square	0	0	25	0	0
	Sphere	3	3	0	19	0

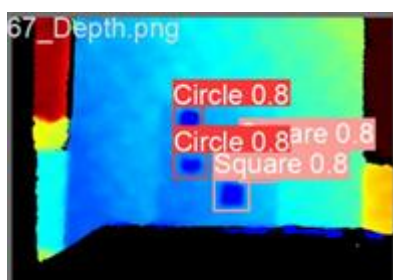


Fig. 4 Result image when two solid figures were trained

Table 3 Test results when two solid figures were trained

		Predicted		
		Circle	Square	Not detected
Actual	Circle	29	0	1
	Square	0	30	0

4. コードとしての認識

4. 1 3D コードの作成

円柱と四角柱の2つの図形を使い、Fig. 5 のように (a)ハウス入口、(b)ハウス出口、(c)収穫終了を意味する3つの3Dコードを作成した。

YOLO の物体認識で得られた図形の個数により 3Dコードを認識する。例えば、円柱が2個で四角柱が1個の場合は”ハウス入口”と認識すると言った具合である。ただし、1つの図形を2つの異なる図形として重複認識する場合があったため、重複時には信頼度の高い図形を採用する処理を追加している。

Table 4 3D code recognition results

		Predicted			
		Entrance	Exit	End	Error
Actual	Entrance	75	0	0	0
	Exit	0	74	0	1
	End	1	0	74	0

4. 2 3D コードの認識実験

作成した3種類の3Dコードを認識させた結果をTable4に示す。Errorとは、3種類のコードのいずれとも合致しなかったことを示す。収穫終了を入口と誤認識したと、出口を認識できなかったことがそれぞれ1回ずつ発生した。精度(正答率)は99.1%であった。十分実用に耐えうる精度と判断し、実際の圃場運用に実装した。

4. 3 圃場での運用

圃場に3Dコードを設置し運用した。運用の様子をFig. 6に示す。図の右上にQRコードとその下に3Dコード(青い板)を設置している。図はハウスの出口付近の様子である。本来なら3Dコードのみで運用したいところであったが、太陽光が直接当たる状況では誤

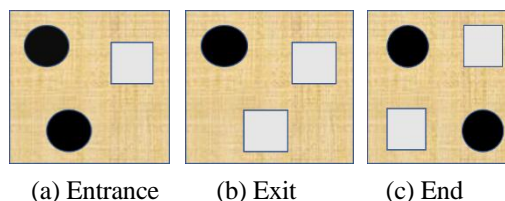


Fig. 5 Schematic diagram of the produced 3D codes



Fig. 6 Field operation

認識が増えることが分かり，周囲の明るさの状況で QR コードと 3D コードを切り替えて認識することとした。数週間の運用であったが誤認識による不具合は生じることはなかった。

5. むすび

アスパラガス収穫機の夜間運用のため，立体図形を用いた 3D コードを作成した。99%以上の認識精度を確認し，実際のアスパラガス収穫機に搭載し運用することが出来た。

謝 辞

本稿は，本校の卒業研究「アスパラガス収穫機を夜間運用するためのコード認識についての研究」をまとめたものである。昨年度，本研究に携わった木下想さん感謝を申し上げます。一昨年度に研究に携わった本校卒業生の木村圭史氏にも心より感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 木下想：アスパラガス収穫機を夜間運営するためのコード認識についての研究：長野県南信工科短期大学校 電気システム学科卒業論文集(第8期生)
- 2) 木村圭史：アスパラガス収穫機を夜間運営するためのコード認識についての研究：長野県南信工科短期大学校 電気システム学科卒業論文集(第7期生)

【原著論文】

マイコンプログラミングを使用しない LED のアナログ点灯制御回路の開発

倉澤勝美*

Development of Analog LED Control Circuit without Microcontroller Programming

Katsumi KURASAWA

あらまし 本研究では、マイコンプログラミングを用いずに LED のアナログ点灯制御を実現する回路の開発を行った。まず、正弦波発振回路としてウィーンブリッジ発振回路を採用し、電圧-電流変換回路を組み合わせることで、単色 LED のアナログ的な明滅制御を実現した。さらに、三相交流電圧波形を生成する CR 移相発振回路と増幅回路を用いて、フルカラーLED の各色を位相差をもって制御し、グラデーション点灯を可能とした。製作した回路は一時的な動作には成功したが、初期調整や長時間動作時の安定性に課題があり、今後の改良が求められる。

Summary This study presents the development of analog LED control circuits that operate without microcontroller programming. Initially, a Wien bridge oscillator was employed to generate a sine wave, which, when combined with a voltage-to-current converter, enabled analog dimming of a single-color LED. Furthermore, a CR phase-shift oscillator and amplifier circuits were used to generate three-phase waveforms, allowing phase-shifted control of red, green, and blue LEDs in a full-color LED, achieving gradient lighting effects. While the circuits functioned successfully in short-term demonstrations, issues such as initial calibration and long-term stability remain, indicating the need for further refinement..

Key Words : Analog circuit, Full-color LED, Wien bridge oscillator, CR phase-shift oscillator, Voltage-to-current converter

1. まえがき

Light Emitting Diode (以下、LED) は手軽に入手できる電子工作素子である。多くの場合は Arduino などのマイコンで制御され、様々なパターンで点灯させることができる。また、フルカラーLED を用いれば、自由な配色で表示させることができる。

一方で、無安定マルチバイブレータを利用した LED 点滅回路を製作する子ども向けイベントで、「マイコンを使用しなくても、LED の点滅ができるのですね」という感想をいただいたことがある。これを受けて、マイコンプログラミングを使用せずに LED の点滅を実現できないか検討した。正弦波発振回路を用いてマイ

コンを使用せずに LED のアナログ的な明滅やフルカラーLED の点灯色を制御する回路を製作した。

2. 子ども向けイベントで製作した回路

子ども向けイベントではパルス発振回路の 1 つであるトランジスタを用いた無安定マルチバイブレータ¹⁾を利用して、LED の点滅回路を製作した。イベントで製作した回路図を Fig. 1 に示す。一般的な無安定マルチバイブレータのコレクタ抵抗の位置に LED と電流制限抵抗を配置し、LED が交互に点滅するようにしている。部品点数もそこまで多くなく、子どもたちが絵を描いた紙製のカバーを、製作した回路の上にかぶせて完成とした。

3. 単色 LED 用のアナログ点灯制御回路

無安定マルチバイブレータの出力はパルス波形であり、デジタル信号として LED の点滅に寄与する。これを発展させ、アナログ信号を用いて LED の明滅が行えないか検討した。

受理 2025 年 10 月 30 日

採択 2025 年 11 月 19 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

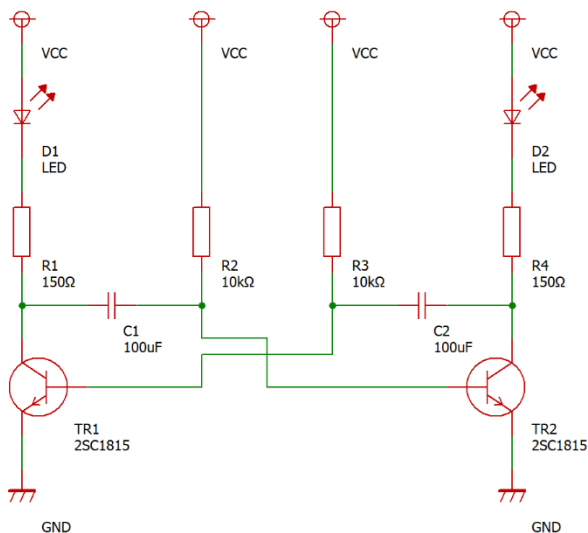


Fig. 1 The circuit used in a children's event.

まず、アナログ信号を用いるため発振回路をパルス発振回路である無安定マルチバイブレータから正弦波発振回路へ変更することとし、ウィーンブリッジ発振回路²⁾を採用することにした。

また、ウィーンブリッジ発振回路は電圧出力であるが、LEDの明るさはおよそ順方向電流に比例する。このため、オペアンプを用いた電圧-電流変換回路³⁾を用いて、電圧値がLEDを明滅させる範囲の電流値に変換されるようにした。

製作した単色LED用のアナログ点灯制御回路の回路図をFig. 2に示す。前段がウィーンブリッジ発振回路、後段が電圧-電流変換回路となる。通常のウィーンブリッジ発振回路では、GNDを中心とした正弦波波形が出力されるが、電圧-電流変換回路に入力することを考慮して、0[V]~2.5[V]の範囲の電圧値が出力されるように、電源電圧には2.5[V]を、中心電圧として1.25[V]を入力するようにした。また、電圧-電流変換回路では、入力電圧が2.5[V]のときにおよそ20m[A]が出力されるように抵抗を選定した。

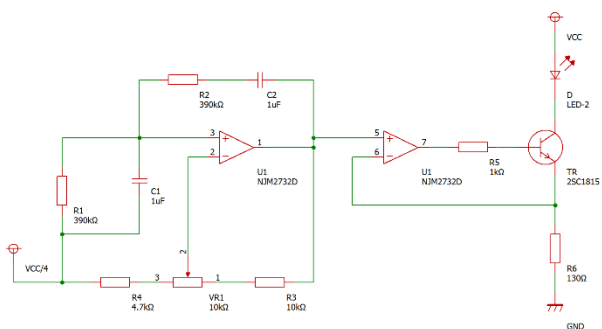


Fig. 2 The analog control circuit for single-color LED.

4. フルカラーLED用の点灯色制御回路

さらに応用回路としてフルカラーLEDに適用できないか検討した。フルカラーLEDは内蔵される赤・緑・青の各色のLEDを別々に制御することで、各色を配色して様々な色で点灯させることができるLEDである。三相交流波形のような信号を準備し、電圧-電流変換してフルカラーLEDと接続することで、グラデーション点灯が可能であると考えた。

三相交流電圧波形を出力させるために3段のCR移相発振回路⁴⁾を利用した。製作したCR移相発振回路部分をFig. 3に示す。

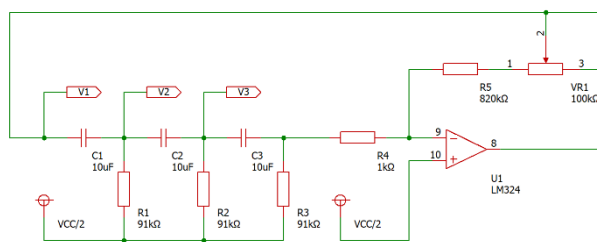


Fig. 3 CR phase shift oscillator circuit section.

CR移相発振回路はCRハイパスフィルタを3段に重ね、中間出力信号を反転増幅回路で増幅して入力側に戻す回路となっている。CRハイパスフィルタの遷移領域を使用することで、位相を1段あたり60°ずつ遅らせ、反転増幅回路で減衰分を増幅するとともに、位相を180°変換して入力に戻している。

反転増幅回路の増幅度が大きすぎる場合、正弦波波形とならないため、可変抵抗を設けて調整できるようにした。また、単色LEDのウィーンブリッジ発振回路と同様に、CR移相発振回路も通常はGND中心の波形となるため、後段に接続する電圧-電流変換回路への入力を考慮して2.5[V]が中心電圧となるようにした。

CR移相発振回路では、反転増幅回路から出力されるフィードバック信号(Fig. 3中V1)を基準にCRハイパスフィルタへの入力位相は、V1が0°、V2が60°、V3が120°となる。この2段目の入力電圧の位相を180°変換することにより、0°、120°、240°(=60°+180°)の三相交流電圧波形を得ることができる。

ただし、CRハイパスフィルタでの減衰分を考慮して、2段目の入力電圧V2は位相変換も含めて反転増幅回路⁶⁾へ、3段目の入力電圧V3は非反転増幅回路⁷⁾へ入力した。抵抗には可変抵抗を用いて、波形振幅のバランスが調整できるようにした。

製作した反転増幅回路／非反転増幅回路部分を Fig. 4 に示す。増幅回路部分でも増幅の中心電圧が 2.5[V] となるようにした。

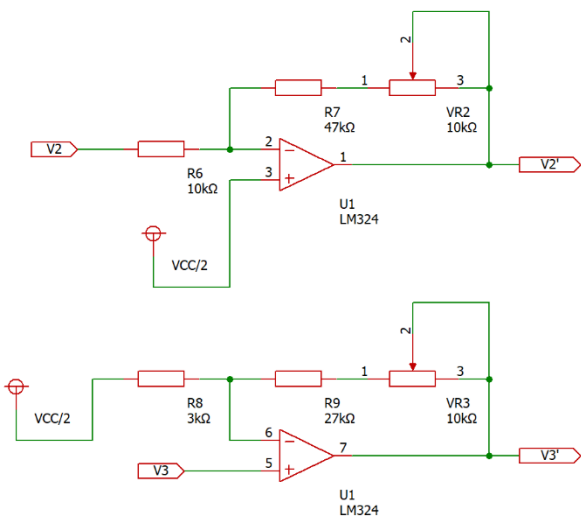


Fig. 4 Inverting and non-inverting amplifier circuit section.

得られた三相交流電圧波形のそれぞれの相を単色 LED の制御回路と同じように電圧・電流変換回路に入力し、赤・緑・青のそれぞれの LED に接続した。これにより各色 LED の明滅を位相差 120° で制御することになり、LED をグラデーション点灯させることができるようになった。

電圧・電流変換回路部分を Fig. 5 に示す。発振回路から出力された三相交流電圧波形の出力波形の下限値が 0[V] 付近まで落ちなかったため、0.8[V] 程度のバイアス電圧を加えて調整した。

5. 製作した回路の評価

製作した回路を点灯させ、子ども向けイベントへの出展が可能か評価した。まず単色 LED、フルカラー LED のいずれの制御回路も無安定マルチバイブレータを利用した回路に比べて部品点数が多く、イベントで子どもを対象に製作することは困難であると考えた。

さらに、イベントでのデモンストレーション展示についても検討した。1 つ目に初期状態が安定しないため、電源投入ごとに発振回路の調整が必要となる点が問題であると考えた。イベントの準備作業はなるべく工数を少なくしたいが、本装置を展示するためには電源をつなぐだけでは動作せず、初期調整の手間が増えてしまう。また、調整時に LED の明滅状態だけで正弦波波形の出力を判断するのは困難であり、オシロスコープを用いて波形を確認する必要がある。

2 つ目に正弦波発振がある程度安定しても、長時間の展示の中で収束あるいは発散してしまい、発振が停止する、あるいはパルス波に発散してしまう点も問題である。前者の場合は定電流の点灯状態に固定され、後者の場合は無安定マルチバイブレータのようなデジタル的な点滅状態となる。この状態となったら発振回路の再調整を行わなければならない、長時間の展示を行う際には定期的にメンテナンスのための調整を行う必要がある。

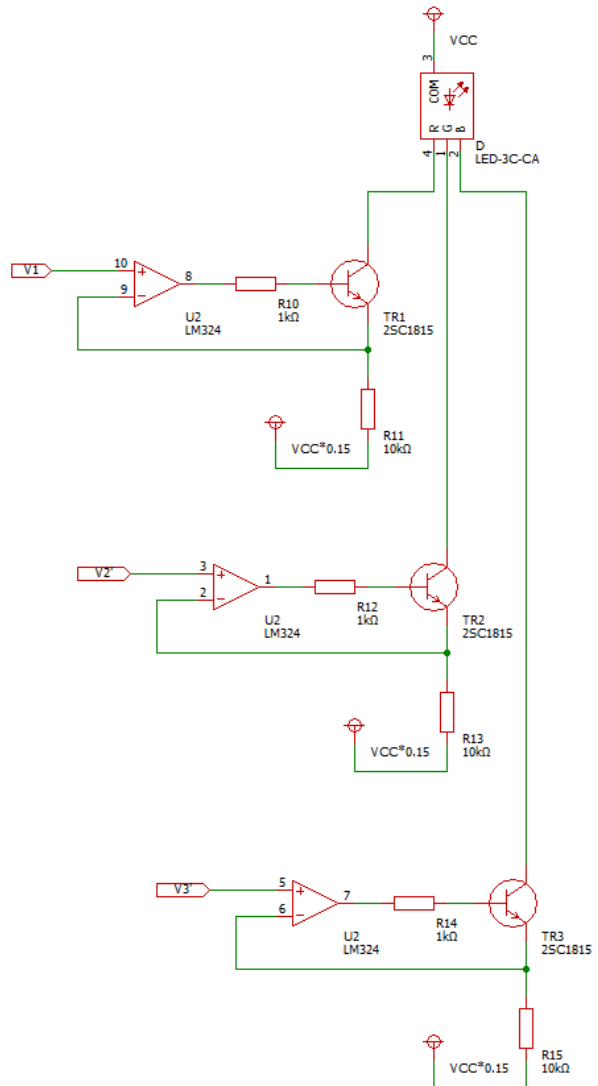


Fig. 5 Voltage-to-current converter circuit section.

6. むすび

マイコンプログラミングを用いることなく LED のアナログ点灯制御回路を製作した。ウィーンブリッジ発振回路を用いた単色 LED 用制御回路と CR 移相発振回

路を用いたフルカラーLED用制御回路の2種類を製作した。

いずれの回路も初期調整や保守調整が必要となるものの、一時的な動作については実現できた。今後、より扱いやすい装置となるように改善していきたい。

参 考 文 献

- 1) 大熊康弘, “図解でわかるはじめての電子回路”, 技術評論社, 296-301 (2002).
- 2) 樋口英世, “例題で学ぶアナログ電子回路入門”, 森北出版, 128-130 (2012)
- 3) 岡村廸夫, “定本 OP アンプ回路の設計”, CQ 出版社, 252-257 (1990)
- 4) 樋口英世, “例題で学ぶアナログ電子回路入門”, 森北出版, 125-127 (2012)
- 5) 樋口英世, “例題で学ぶアナログ電子回路入門”, 森北出版, 175 (2012)
- 6) 大熊康弘, “図解でわかるはじめての電子回路”, 技術評論社, 213-218 (2002).
- 7) 大熊康弘, “図解でわかるはじめての電子回路”, 技術評論社, 219-221 (2002).

PLC の短時間プログラミングに関する研究 — Rapid プログラミングの可能性 —

清水英孝*

Study on short time PLC Programming — Possibility of Rapid Programming —

Hidetaka SHIMIZU*

あらまし 本論文では PLC の短時間プログラミング手法として、従来の Ladder Diagram に状態遷移法の考え方を加えた方法を提案する。この手法は、作成するプログラムの構造を容易に記述できることからプログラミング初心者において短時間での Ladder Diagram プログラミングに有効である。

Summary This paper proposes a method for rapid PLC programming, which combines the traditional ladder diagram approach with the concept of state transition diagrams. This method is effective for beginners in ladder programming because it allows them to easily describe the structure of the programs to be created.

Key Words : PLC, programming language, IEC 61131-3, ladder diagram, state transition diagram

1. まえがき

生産ラインに組み込まれるなどして利用される PLC において、そのプログラミング言語については、IEC61131-3 国際基準でも 6 種類のプログラミング手法が定められている。また、それ以外にも PLC メーカーが独自に高級言語の開発環境を提供している場合もある。PLC のプログラムは装置の高性能化や大容量化に伴い、プログラミングするステップ数が増大している。そのため、開発において短時間でのシンプルなプログラミングを目指すものではない。しかしながら、初学者に PLC プログラミングを教えるにあたっては、PLC の内部構造やコマンドを教えるだけではなく、基準とするプログラミングの考え方を示した方がよい。特に技能検定など、技術者のスキルを試される場面では短時間で課題の条件を満たす PLC プログラミング

を完成させる必要がある。本論文では、リレーシーケンス制御においても数多く用いられている状態遷移法をベースに、課題に対して初学者でも短時間で PLC プログラムを完成できる手法を紹介する。

2. リレーシーケンスでの開発

まず、PLC より以前から利用されていたリレーシーケンスについて述べる。リレーシーケンスでは、図の両側に直流の電源線と Gnd 線を記述し、スイッチやランプ、リレーの接点やコイルを記述する。この図は縄ばしごのようにみえるためラダー図と呼ばれてきた。

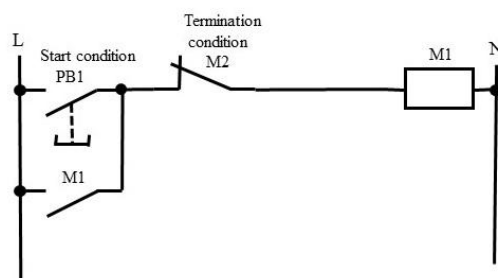


Fig. 1 Self-holding circuit

受理 2025 年 9 月 30 日
採択 2025 年 11 月 20 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

リレーシーケンスは、記憶装置を内蔵していないがリレーのコイルを自らの接点で励磁し続けることにより、外部からの入力信号を保持することができる。これを自己保持回路と呼ぶ。自己保持回路は Fig. 1 のように押しボタンと並列にリレー自身の a 接点を接続し、その出力をリレーのコイルと接続した回路である。

一度、押しボタンスイッチが押されれば、リレーのコイルが励磁され a 接点が閉じるため、その後、押しボタンを離しても自身の a 接点によりコイルが励磁され続ける。

ここで、一般的な信号機として動作する回路を考える。信号機は一定時間毎に、青色→黄色→赤色→青色→…と信号が順次点灯する。動作回路設計の際に、信号動作中の動作を保持するリレーが 1 個あれば信号回路を作成できる。しかしながら、“青ランプ点灯状態”，“黄ランプ点灯状態”，“赤ランプ点灯状態”と出力の状態毎に自己保持するリレーを配置すると回路の可読性が上がり、わかりやすくなる。各ランプの点灯時間を管理するためにタイマーを用いて各自己保持回路に組み込み、Fig. 2 に信号機として動作するラダー図を示す。この図のように 1 つの自己保持回路に対して、1 つのリレーを対応させると、リレーの ON/OFF で状態を管理でき、各状態についての動作を記述することで読みやすい目的回路を作成することができる。

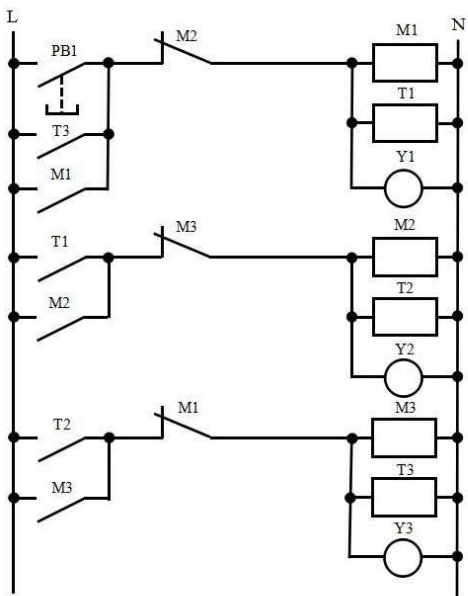


Fig. 2 Ladder circuit that form traffic lights

3. PLC での開発

PLC プログラミング言語については国際規格 IEC 61131-3 が定められており、JIS B3503 が IEC 61131-3 に倣った国内規格として規定されている。

Fig.2 で図示したラダー図を PLC で実現するには、これら規格の中で規定されている LD(Ladder Diagram) 言語を使うとラダー図同様に記述することができる。

4. 提案する手法

本論文で提案する手法は次の通りである。

- ・タイムチャートや仕様で示される課題から入出力の変化を適切な状態に分ける。
- ・分けられた各状態を自己保持回路に置き換える。出力のリレーは外部リレーでもよいが、PLC の内部リレーとした方が扱いやすい。
- ・自己保持回路の起動条件は前状態と入力信号による起動条件の and 回路とする。これは、複雑な回路になった場合と同じ起動条件でいくつもの自己保持回路が起動することを避けるためである。
- ・各自己保持回路を読みやすい順序に並べ、タイムチャートや仕様で示される課題の通りに状態を遷移させる自己保持回路の組み合わせを作成する。

ここでは、各自己保持回路から起動する次の自己保持回路で自己保持が始まったことを確認して、前の回路の自己保持を解いている。この方法であれば、同時に起動している自己保持回路を複数持つことができ、装置内での同時並列処理も特に変更することなく実現することが可能となる。

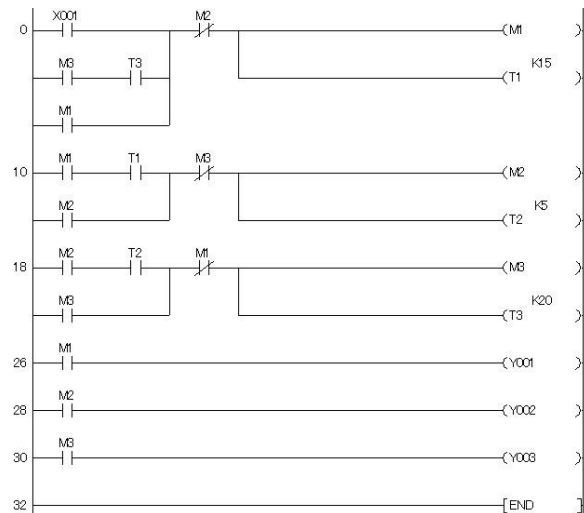


Fig. 3 Ladder Diagram on PLC

・タイムチャートや課題で示される出力の条件に従い、自己保持回路の接点の組み合わせによる出力動作の回路を作成する。

最後の条件について出力をまとめるのは、初心者にありがちな 2 重コイルによる動作の不一致を防ぐためと、処理と出力をラダー上で分離する、というラダーの読みやすさを考慮しているからである。これらの条件をクリアする LD は Fig.3 として記述できる。

課題から適切な自己保持回路に分ける段階で、この手法を考えやすくするために、図と表の利用も提案したい。情報技術分野では仮想機上でプログラムがきちんと動作するかを検討するオートマトンの研究が早くより進んでいる。この中で、オートマトンの状態を制御するための状態遷移法が提案されている。ここで、これまで検討していた信号機の動作をオートマトンの状態遷移図で書いたものを Fig.4 に示す。

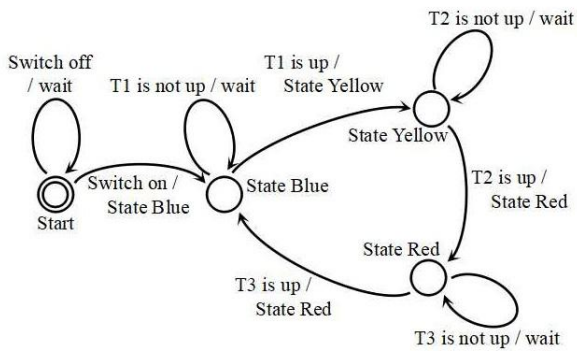


Fig. 4 State transition diagram that form traffic lights

Figure 4 で示した状態のうち、初期状態は自己保持回路で実現しなくても問題ないので、3 つの状態を自己保持回路で実現することにより、Fig. 3 で示した LD 言語を容易に実現できる。

謝 辞

PLC のプログラミング全般について、数多くのディスカッションをさせていただいたすべての先達に感謝します。特に長期間に渡り様々な検討をさせていただいた渡辺祐子先生(元三菱電機㈱)には深謝いたします。

参 考 文 献

1) 大野秀嶺, “实用シーケンス制御ハンドブック”, 高井宏幸, 115-121, オーム社 (1968).

2) 岡本裕生, “やさしいリレーとシーケンサ (改訂 3 版)”, 村上和夫, 76-77, オーム社 (1997).
 3) 石橋正基, “カラー徹底図解 基本からわかるシーケンス制御”, 田村正隆, ナツメ社 (2018).
 4) 岡留剛, “例解図説 オートマトンと形式言語入門”, 1-7, 森北出版社(2015)

【解説】

テクスチャリングされた基板と塗膜の付着性調査

小林義和*

Adhesion Properties of Coating Films on Textured Metal Sheets

Yoshikazu KOBAYASHI

あらまし 工業製品表面への塗装は、視覚的、触覚的な品質を向上させるだけでなく、防錆効果の向上など機械的な特性を向上させるためにも重要な技術である。しかし、多様な表面形状への対応や温度・湿度に代表される塗装環境など考慮すべき因子が多岐にわたるため、塗料噴射量や塗装時間などの明確な塗装条件と塗装特性を報告した文献は少ない。そこで本研究では、塗装ロボットを試作し、製品への高品質塗装を実現するための基板と塗膜の付着性を調査した。

Summary Coating the surfaces of many engineering products is important as it improves both visual and tactile quality and provides protective effects. However, there are no clear guidelines regarding conditions such as coating application quantity or the number of coating cycles for products with various surface textures. In this work, we developed an experimental coating robot and evaluated the relationship between coating characteristics and surface textures to achieve high-quality coating of products.

Key Words : Coating, Surface texture, Cross cut test, Bend test

1. まえがき

自動車など多くの工業製品の表面には塗装が施されている。塗装は視覚・触覚品位の向上や防腐効果により製品の付加価値を向上させる重要な技術である。しかしながら、種々の表面形状を有する製品への高品質な塗装を行うための塗装条件、すなわち塗料の成分、噴射量や塗装回数などを明確に記述したデータは公表されていない。

本研究では、塗装ロボットを試作し、表面性状を変えた基板に塗装することで基板の表面性状と塗膜の付着特性を調べることを目的とする。

2. 塗装ロボットの開発

様々な条件下で基板への塗装を行うため、塗装ロボットを開発した。図 1 に塗装ロボットのシステム構成を示す。制御 PC とコントローラ(オリエンタルモータ

社 EMP402)は、RS232C 及び専用ケーブル (FC04W5) で接続されており、制御 PC からコントローラへ命令を送ることで 2 軸の電動スライダ (オリエンタルモーター社 SPV シリーズ) が動作する。制御 PC からの命令 (移動量, 移動速度) はコントローラ, ドライバ (オリエンタルモーター社 ESMC-A2) を介して電動スライダを動作させる。

また、制御 PC からの命令で、ミニパワーリレーを介してソレノイドバルブへ DC24V 電源から電力が供給される。これによりソレノイドバルブが開口し、自動ガンへエアークンプレッサーからエアが供給され、加圧コンテナに充填した塗料が噴射される。なお噴射する塗料の量は自動ガンにより調整する。

図 2(a)に塗装ロボットの外観を示す。本塗装ロボットシステムは、制御部と塗装ブースから構成されている。制御部は、電動スライダの動作及び自動ガンからの塗料噴射を制御する部分である。塗装ロボットの制御部は、制御 PC, コントローラ, ドライバ 2 台, DC24V 電源, 端子台及び塗料噴射制御機構であるミニパワーリレーとソレノイドバルブにより構成されている。

図 2(b)に示す塗装ロボットの塗装ブースは XY2 軸直交型の電動スライダと X 軸電動スライダに取り付けられた自動ガンから構成されている。塗装は、自動ガン

受理 2025 年 11 月 4 日

採択 2025 年 11 月 28 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 Electrical Systems Engineering,
Nagano Prefecture Nanshin Institute of Technology,
8304-190 Minaminowa, Nagano, 399-4511 Japan

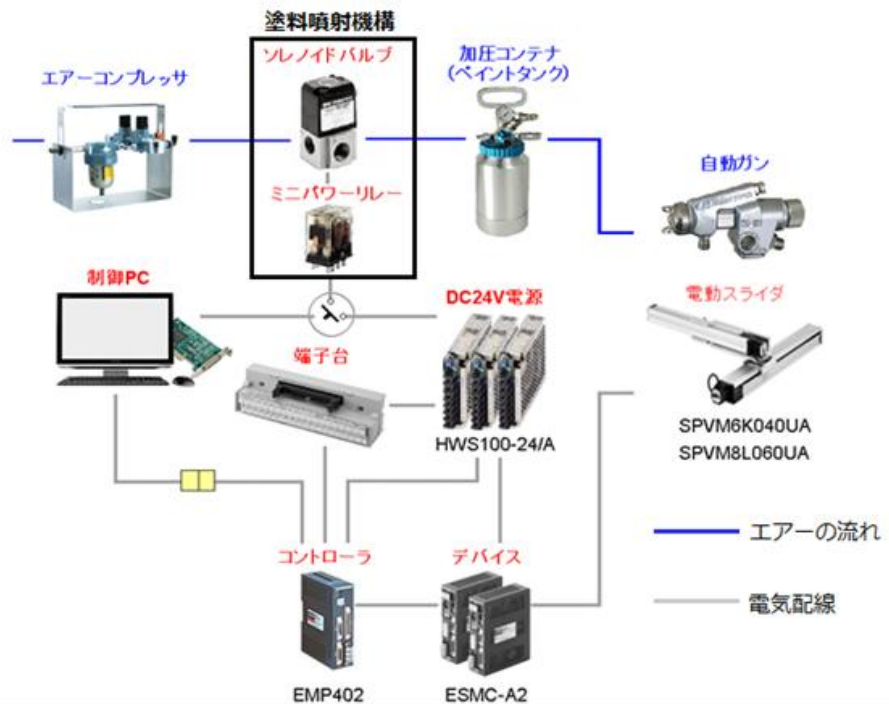
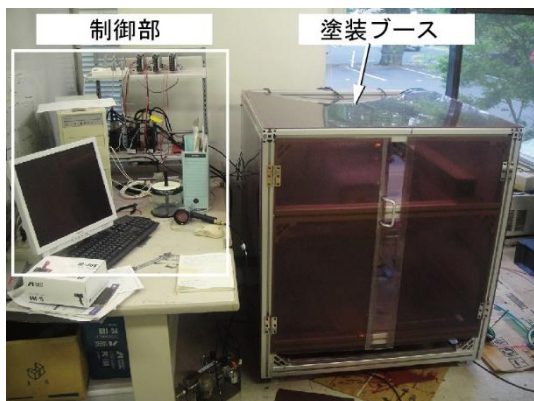
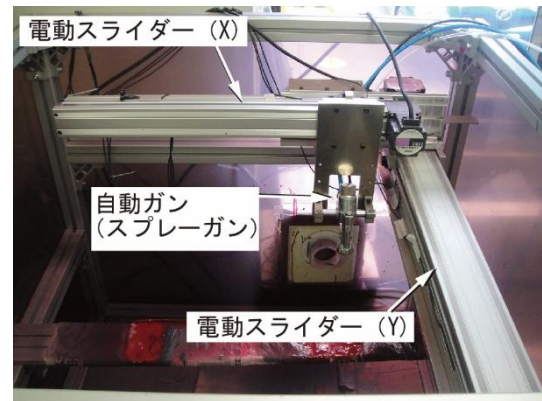


Fig. 1 System configuration of the developed coating robot



(a) Overall view of the coating robot



(b) Inside the coating booth

Fig. 2 Coating robot

を電動スライダにより移動させることによって行う。
 ブースの大きさは、1000×1000×1200 mm で、最大
 400×350 mm の試料を塗装可能である。

3. 塗装実験と付着性評価

3.1 塗装実験

塗装実験に用いる基板は図 3 に示す冷間圧延鋼板
 (SPCC) とした。サイズは評価試験に合うように①
 50×50×1.3 mm, ②100×50×1.3 mm とし、表面性状
 は Sq(二乗平均平方根高さ)=1.3~1.4 μm である。

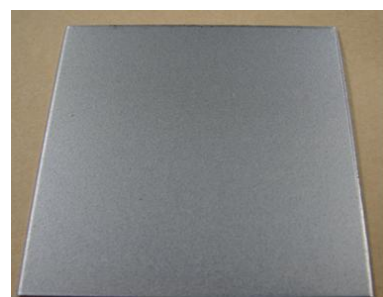


Fig. 3 ①50×50×1.3 mm Substrate
 (SPCC, Steel Plate Cold Commercial)

基板への塗装処理は、図 4 に示す様に脱脂処理行っ
 た後、下地塗装(プラサフ処理)、上塗り塗装(ベース塗

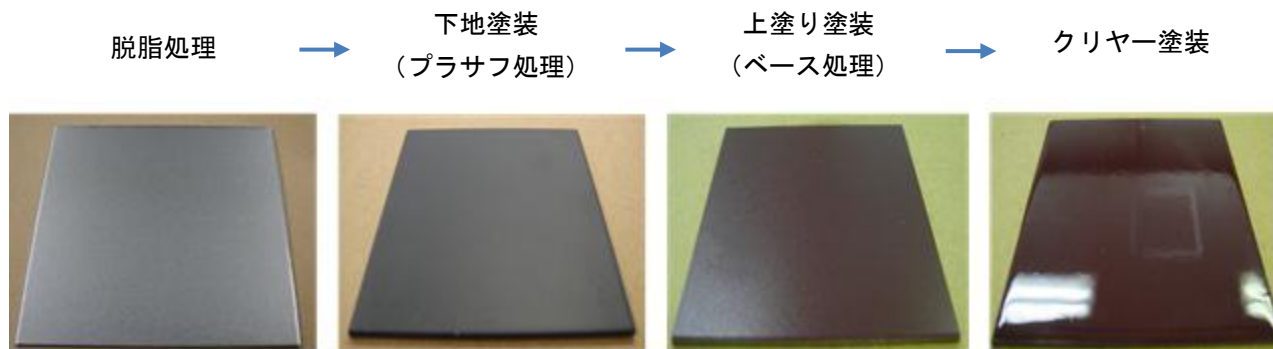


Fig. 4 Coating process procedure for substrates

装), クリヤー塗装(仕上げ塗装)の順に行った。一般に下地塗装には、防腐効果、上塗り塗料の発色を良くする効果及び基板表面のヒケや傷を埋めるなどの効果がある。上塗り塗装は、製品の着色をする塗装である。仕上げのクリヤー塗装には、艶出し、表面保護及び触覚効果の向上などの効果がある。塗装は、室温 20～26℃、湿度 28～35%の環境下で行った。また、塗料には日本ペイント製の水性塗料を使用した。

まず、基板に異なる回数の下地処理と上塗り塗装をし、塗装回数の違いによる表面性状を調べた。エア圧力は 0.3 MPa、塗装速度は 50 mm/s とした。16 枚の基板のうち 4 枚ずつに下地処理を 0～3 回行い、異なる回数の下地処理を行った基板に上塗り塗装を 1～4 回ずつ行った。また、仕上げのクリヤー塗装は 2 回ずつ行い、それらの表面を走査型白色干渉計で測定した。その結果を表 1 に示す。表面性状は面粗さパラメータの Sq と Sz (最大高さ) を代表値とした。塗装をすることにより表面はなめらかになるが、下地、上塗りの各塗装回数が増えても表面は粗くなる。今回の条件では各塗装 2 回程度までが表面の粗さは小さいがそれ以上になると増加する傾向がみられる。また、図 5 に示すそれぞれの塗装回数における表面写真を示す。塗装回数が増加すると色合いが濃くなっていることがわかる。

3. 2 テクスチャ処理を行った基板への塗装と付着性評価

80 番、150 番、220 番、500 番、800 番及び 1200 番の 6 種類のサンドペーパーを用いて筋目方向が①直線、②縦横直行クロス、③45° クロスとなるように基板表面をテクスチャ処理した。代表例として 80 番でテクスチャ処理した表面写真を図 6 に示す。筋目がそれぞれの角度になっていることがわかる。また、それらの基板へ最も滑らかな表面が得られた下地塗装、上塗り

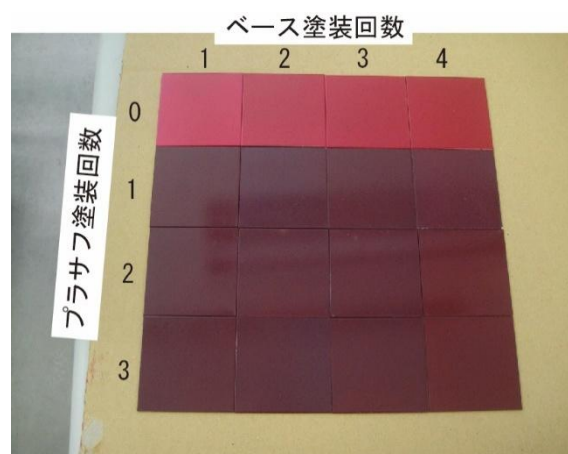


Fig. 5 Surface photographs of different number of Coatings

Table 1 Relationship between the number of coats and surface texture

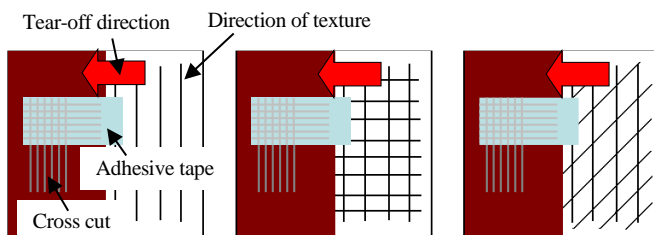
下地塗装回数	上塗り塗装回数	$Sq (\mu m)$		$Sz (\mu m)$	
		塗装前	塗装後	塗装前	塗装後
なし	1回	1.38	0.70	22.40	4.82
	2回	1.30	0.80	19.05	7.60
	3回	1.26	0.91	24.37	8.21
	4回	1.31	0.75	28.24	8.69
1回	1回	1.41	0.60	14.70	5.38
	2回	1.33	0.69	34.19	6.09
	3回	1.30	0.77	29.47	13.33
	4回	1.31	1.10	14.17	11.16
2回	1回	1.44	0.48	19.28	4.55
	2回	1.40	0.44	20.16	3.94
	3回	1.46	0.92	24.39	7.01
	4回	1.28	1.04	15.26	18.25
3回	1回	1.37	0.75	23.84	8.94
	2回	1.30	0.74	19.43	6.57
	3回	1.34	0.88	32.53	12.12
	4回	1.28	1.04	17.97	8.77

塗装及びクリヤー塗装を 2 回ずつ行い、その表面性状を走査型白色干渉計で測定した。エア圧力及び塗装速度は前に述べた塗装実験と同じくそれぞれ 0.3 MPa と 50 mm/s とした。



(a) One direction (b) 90° cross (c) 45° cross

Fig. 6 Photograph of textured substrate surface (#80 sandpaper)



(a) One direction (b) 90° cross (c) 45° cross

Fig. 7 Cross-cut method for each sample

まず、塗装した基板の塗膜の付着性をクロスカット法¹⁾により評価した。クロスカット法は塗膜表面上にカッターナイフで2 mm 間隔に6本の切込みを入れて25マスの正方格子を作り、そこに付着テープを貼った後引き剥がし、塗膜が剥がされた割合を分類表(表2)から評価する方法である。なお、クロスカットの方向及び付着テープの貼り付け位置と引き剥がし方向は図7として実験を行った。テクスチャ処理をせずに

塗装したものを含む19種の基板3枚ずつにクロスカットを行い、塗膜の付着性が良かった順に分類0~5(分類表では5点~0点)の6段階の評価値を与え、3枚の評価値の平均点を求め評価した。表3に塗装前と後の表面粗さSqとクロスカット法による評価の結果を示す。また、特徴的な実験結果を図8に示す。粗い目のサンドペーパーでテクスチャリングした表面は粗くなり、同様に一方向にテクスチャリングした試料はクロスしたのものよりも粗くなる傾向がある。しかし、塗装後の粗さはほぼ同じ粗さになった。粗さが220番よりも滑らかなサンドペーパーでテクスチャ処理をした基板の評価は全く剥がれのない分類0又は切り込みの交差点において僅かな剥がれがある分類1を得た。しかしながら、80番及び150番のサンドペーパーでテクスチャ処理をした基板には、切り込みに沿って剥がれがある分類2や格子内における大きな剥がれがある分類3も検出された。

次に円筒形マンドレル法²⁾での評価を行った。円筒形マンドレル法は、塗装後の基板を折り曲げて塗膜の剥がれの有無を検証する試験法である。本実験では、コーテック社製KT-SP1820円筒形マンドレル屈曲試験器を使用した。図9に円筒形マンドレル試験装置を示す。マンドレルの直径は、2,3,4,5,6,8,10,12,13,16,19,20,25,32 mmの14種である。一般的に、マンドレルの直径が小さいほど塗膜は剥がれやすくなる。評価方法はマンドレル試験

Table 2 Classification table of crosscut method

分類	説明	はく離(はがれ)が生じているクロスカット部分の表面の状態 (6種の並行カットの例)
0	カットの縁が完全に滑らかで、どの格子の目にもはがれがない。	—
1	カットの交差点における塗膜の小さなはがれ。 クロスカット部分で影響を受けるのは、明確に5%を上回ることはない。	
2	塗膜がカットの縁に沿って、及び/又は交差点においてはがれている。クロスカット部分で影響を受けるのは明確に5%を超えるが15%を上回ることはない。	
3	塗膜がカットの縁に沿って、部分的又は全面的に大はがれを生じており、及び/又は目のいろいろな部分が、部分的又は全面的にはがれている。クロスカット部分で影響を受けるのは、明確に15%を超えるが35%を上回ることはない。	
4	塗膜がカットの縁に沿って、部分的又は全面的に大はがれを生じており、及び/又は数か所の目が部分的又は全面的にはがれている。クロスカット部分で影響を受けるのは、明確に35%を上回ることはない。	
5	分類4でも分類できないはがれ程度のいずれか。	

転載：JIS K5600-5-6 塗料一般試験方法—第5部：塗膜の機械的性質—第6節：付着性 (クロスカット法)

Table 3 Surface roughness and evaluation of cross-cut method for each sample

試料	Sq(μm)		クロスカット法による評価	
	Before coating	After coating	分類番号 (試料3枚分)	平均点
テクスチャ処理なし	1.17	0.42	0, 1, 1	4.3
#80 直線	2.39	0.68	0, 2, 3	3.3
#80 縦横直交クロス	1.34	0.48	0, 1, 2	4.0
#80 45° クロス	1.22	0.56	0, 1, 1	4.3
#150 直線	1.40	0.48	0, 1, 2	4.0
#150 縦横直交クロス	1.31	0.43	1, 1, 2	3.7
#150 45° クロス	1.11	0.31	0, 1, 1	4.3
#220 直線	1.22	0.51	0, 0, 1	4.7
#220 縦横直交クロス	1.05	0.40	0, 1, 1	4.3
#220 45° クロス	0.94	0.45	0, 1, 1	4.3
#500 直線	1.06	0.31	0, 0, 0	5.0
#500 縦横直交クロス	0.89	0.47	0, 0, 0	5.0
#500 45° クロス	0.80	0.60	0, 0, 0	5.0
#800 直線	0.96	0.41	0, 0, 1	4.7
#800 縦横直交クロス	0.75	0.44	0, 0, 1	4.7
#800 45° クロス	0.75	0.31	0, 0, 1	4.7
#1200 直線	1.08	0.52	0, 1, 1	4.3
#1200 縦横直交クロス	0.68	0.46	0, 0, 0	5.0
#1200 45° クロス	0.69	0.36	0, 0, 1	4.7

後基板を目視及びルーペで観察し、塗膜の割れ及び基板からの剥がれの有無を確認する。この時、試験片の端から 10mm 以内の塗膜面は無視し、塗膜の割れ及び剥がれが検出されるまでマンドレルの直径を小さくしていき、割れ及び剥がれが発生した時のマンドレル直径を記録する。

円筒形マンドレル試験には、50×100 mm の基板を使用し、基板表面へのテクスチャ処理はクロスカット試験のときと同じく、①直線、②縦横直行クロス、③45° クロスとなるようにテクスチャ処理を行った。塗装回数も同じく下地処理、上塗り塗装及びクリアー塗装を2回ずつ行ったものを使用した。今回の試験では塗膜を剥がす目的で厳しい条件となるマンドレルの直径を 6 mm, 4 mm, 2 mm の順に変化させて評価した。

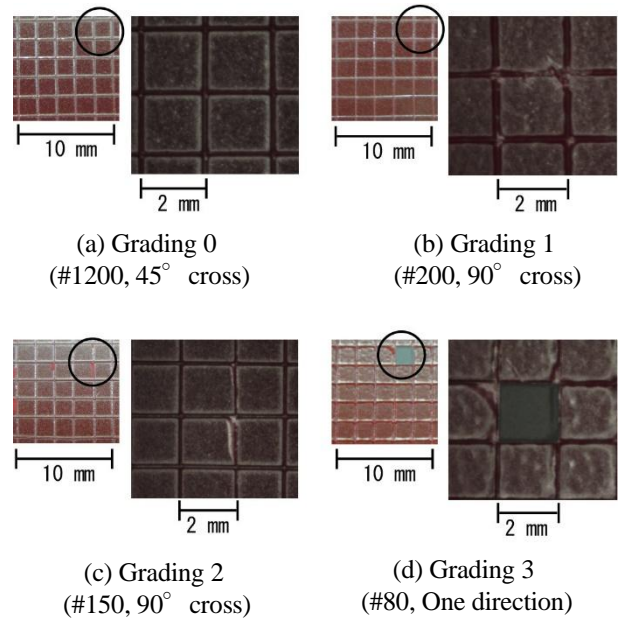


Fig. 8 Typical surface photos of cross-cut method

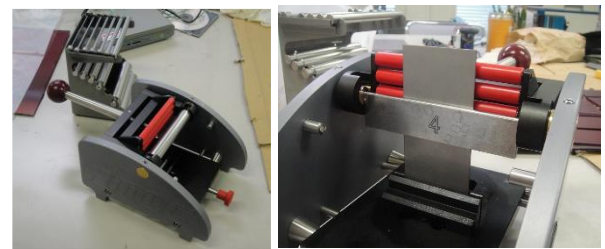


Fig. 9 Bend test (cylindrical mandrel)

試験結果の一例として図 10 に 80 番のサンドペーパーで②縦横直行クロスのテクスチャ処理をした基板の円筒形マンドレル試験結果を示す。塗膜の剥がれがないことがわかる。また、全ての試料において塗膜の剥がれは検出できなかった。

以上の試験結果を受け、これらの結果がどのような要因に起因するかを調べるため基板と塗膜の界面の状況を SEM (Scanning Electron Microscope) により観察

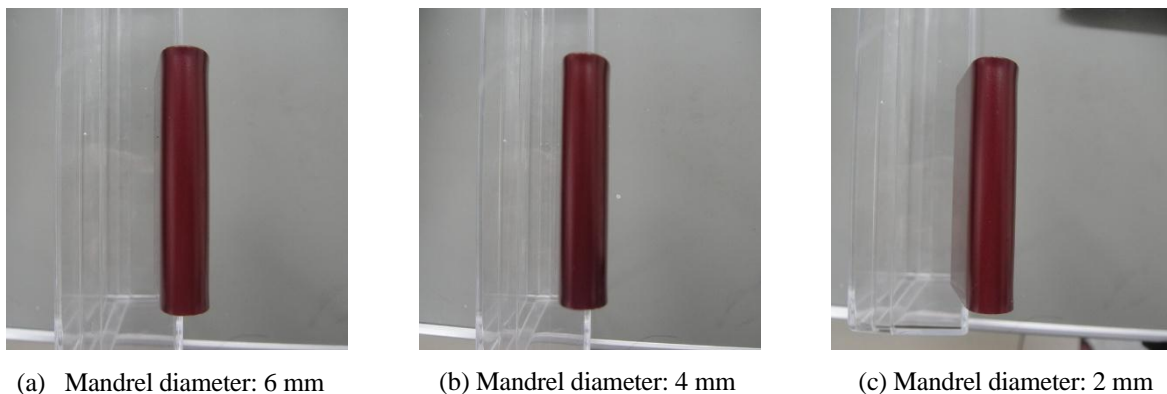


Fig. 10 Results of mandrel bend test (#80, 90° cross)

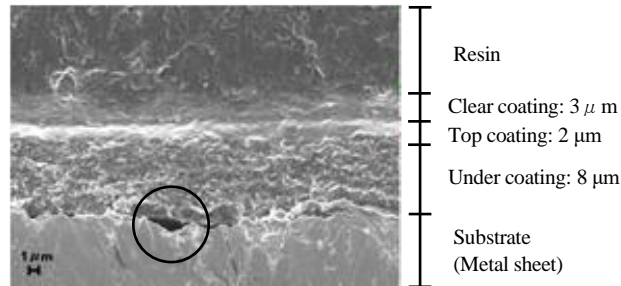


Fig. 11 SEM image of the interface between substrate and coating film (#80, One direction)

した。その結果を図 11 に示す。この SEM 像のように丸枠に示す基板と下地塗膜の間に隙間が発生しているものが見られた。この隙間は、基板表面が粗いものほど顕著に見られる傾向にあった。したがって、この下地塗膜が基板表面と密着していない隙間の存在が塗装の付着性に影響する一要因と考えられる。

4. むすび

開発した塗装ロボットで塗装特性と表面テクスチャとの関係を調べ以下の結論を得た。

- (1) 塗装実験を行うため塗装速度，塗料噴射量，及び塗装回数を変えることができる塗装ロボットを開発した。
- (2) 表面性状を変えた基板に塗装し，クロスカット法と円筒形マンドレル法により付着性を評価した。クロスカット法の結果では，基板の表面粗さが小さくなる

と基板と塗膜の付着性が良くなり，今回の実験では 500 番のサンドペーパーでテクスチャリングしたものの付着性が一番良くなった。そして，更に基板表面が滑らかになると付着性は悪くなった。さらに直線的にテクスチャリングしたものよりクロスにテクスチャリングした基板の方が付着性は良くなった。

(3) 円筒形マンドレル法においては今回の実験では塗膜の剥がれは見られなかった。

参 考 文 献

- 1) JIS K5600-5-6 塗料一般試験方法—第 5 部：塗膜の機械的性質—第 6 節：付着性(クロスカット法)，1999 年
- 2) JIS K5600-5-1 塗料一般試験方法—第 5 部：塗膜の機械的性質—第 1 節：耐屈曲性(円筒形マンドレル法)，1999 年

【解説】

異形工具に対応した C-Space に基づく 5 軸制御加工のための工具経路生成

岡本 謙^{* **}・森重功一^{**}

C-Space based Tool Path Generation for 5-Axis Controlled Machining with Variant Shape Tools

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

あらまし この論文は、異形工具を用いた 5 軸制御加工に対して、加工戦略に基づいて工具経路を生成する方法に焦点を当てている。工具経路の生成に関する多くの研究では、従来からボールエンドミルを対象として、工具干渉を避けながら高品質な加工を実現する戦略的な工具経路の自動生成法が提案されてきた。一方、近年ではさらに高効率な加工を目指して、大きな切れ刃 R を持つ仕上げ加工用の異形工具が注目されている。この異形工具は、大きなピックフィードでも滑らかな仕上げ面を実現することが可能で、生産性が高い。しかし異形工具を用いた 5 軸制御加工は、従来のボールエンドミルとは異なり、作業設計の手順が一般化されていない。本研究では、異形工具を従来のボールエンドミルと同様に戦略的に扱うことを目的として、C-Space に基づいた工具経路の生成法を提案する。C-Space 上に刃先の情報を反映させることで、加工戦略に基づいた切れ刃部の使用に対応する干渉のない工具姿勢の決定が可能となる。最後に、提案する手法の有用性を確認するために行った、加工シミュレーションと加工実験の結果を示す。

Summary This paper describes a method for generating toolpaths based on machining strategies for five-axis controlled machining using variant shape tools. Traditionally, most toolpath generation studies focused on ball-end mills, proposing strategic methods to achieve high-quality machining while avoiding tool interference. Recently, special finishing tools with large cutting edge radii have gained interest for achieving higher machining efficiency. These variant shape tools can produce smooth finished surfaces even with large pick-feed widths, leading to higher productivity. However, unlike conventional machining with ball-end mills, five-axis controlled machining using variant shape tools lacks standardized work design procedures. This study proposes a method for generating toolpaths based on configuration space (C-Space). This method strategically treats special tools as conventional ball-end mills. By mapping the cutting edge radius information onto the C-Space, we can determine the interference-free tool posture corresponding to the chosen cutting edge section based on the machining strategy. Finally, the paper presents machining simulations and experiments conducted to confirm the effectiveness of the proposed method.

Key Words : CAM, Five-Axis Machining, Cutter Location, Variant Shape Tools, Toolpath Generation, C-Space

受理 2025 年 10 月 30 日

採択 2025 年 11 月 19 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 Minamiminowa, 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

1. はじめに

航空機部品のような複雑な形状の加工では、高精度かつ生産性の高い切削加工が強く求められている。現代の工作機械は、制御軸の数を増加させることで、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た¹⁾。5 軸制御工作機械における工具経路の生成に関する研究は、主にボールエンドミルが対象とされてきた。ボールエンドミルは、5 軸制御加工において最も汎用性が高い工具であり、金型などの加工などに広く用いられている。複雑な形状の加工において、干渉のない工具経路を自動的に生成す

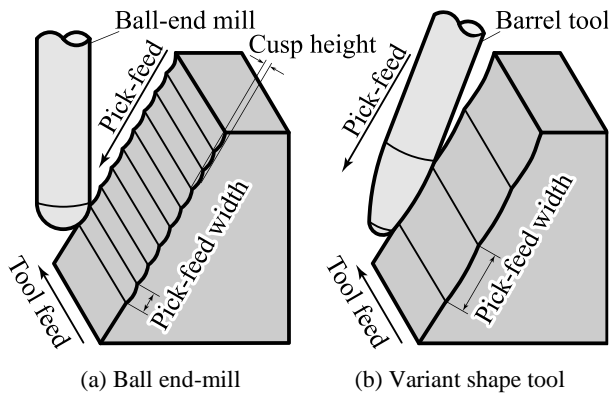


Fig. 1 Comparison of pick-feed widths.

ることを目的とした研究が、1990年代から現在にかけて多く報告されている。

竹内ら²⁾は、CSG (Constructive Solid Geometry)形式のソリッドモデルで表現された形状に対して、同時5軸制御による仕上げ加工を対象とした工具経路(CL)データを自動生成するシステムを開発した。工具干渉を避けるために、工具形状をチェックポイントと呼ばれる点群で近似し、CSGとの内外判定を行うことによって工具干渉の有無を計算している。乾³⁾は、製品形状をボールエンドミルの半径だけ膨張させたoffset shapeを工具経路生成に利用している。工具と工作物との干渉計算を、1本の線分とoffset shapeとの交差問題に置き換えることで、計算を高速化している。同様の交差問題を用いて金子⁴⁾は、工具干渉の有無および直進軸への指令値を2次元平面上の色情報として表すMachine Map法(M-Map)を提案した。M-Mapの平面は、2つの回転軸の角度を縦軸と横軸とする直交座標平面として定義される。M-Mapを切削点間で比較することで、座標変化からは回転軸の速度を、色変化からは直進軸の移動速度をそれぞれ推定することができる。膨大な工具姿勢の候補を比較し、軸の総移動量が最小となる工具経路を生成することができる。

また、ロボットマニピュレータの障害物回避動作に関する研究で用いられているコンフィギュレーション空間(C-Space)が、5軸制御加工の工具経路生成処理に応用されている。この方法は2次元C-Space法⁵⁾と呼ばれる。干渉を生じる不適切な工具姿勢群が、2次元平面上の領域として切削点ごとに記述される。2次元C-Space法では、予め工具が取り得る姿勢の候補群を導出しておくことにより、干渉のない工具姿勢を戦略的に決定することが可能となる。この2次元C-Space法をさらに拡張した報告として、A*アルゴリズムによってC-Spaceを探索することで、回転軸の反転動作を回

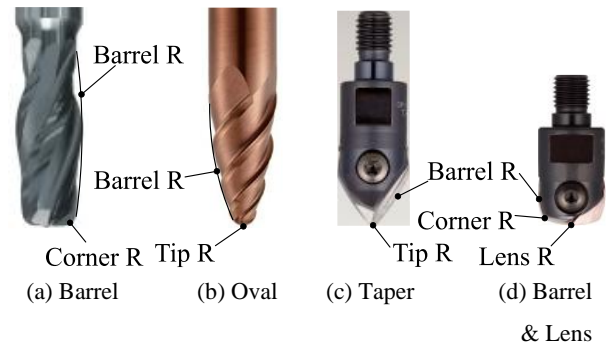


Fig. 2 Four types of barrel tools^{10),15)}.

避し、機械のバックラッシュの影響を低減させた高品質な工具経路の計算法が提案されている⁶⁾。以上のような複数の研究を例として、従来のボールエンドミルを用いた加工については、種々の戦略的な工具経路の生成が実現されている。

ボールエンドミルを用いた加工では、加工面にカスプと呼ばれる切削痕が形作られる。複雑な形状の加工においては、工具の干渉を避けるために、より小径の工具を選択する必要がある。小径工具の利用においては、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設定する必要があり、生産性の悪化につながる。生産性の向上を目的とした研究として、高効率な切削点の配置によるアプローチが提案されている。A. Warkentin⁷⁾やZ. Yuの研究⁸⁾においては、加工面に対する工具の接触点を複数設けることで、ピックフィード量の大きな高効率加工が提案されている。

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工具が登場した。この異形工具は、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。加工経路が短縮されるだけでなく、研削や研磨といった後工程の省略にもつながり、サイクルタイムの大幅な削減に寄与する。Figure 1(b)のような形状の異形工具は、樽型の形状を持つことから「バレル工具」と呼ばれる。現在バレル工具はFig. 2のように複数の工具メーカーよりバレル型やレンズ型など用途に応じた様々な形状が提案されている。また、バレル型とレンズ型を併せ持つFig. 2(d)など、複数の形状を組み合わせた複合型も提案されている⁹⁾¹⁰⁾。これらのバレル工具は、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。

我々は先行研究において、工具姿勢の急変を避けた、異形工具による高精度・高効率加工を提案した。カス

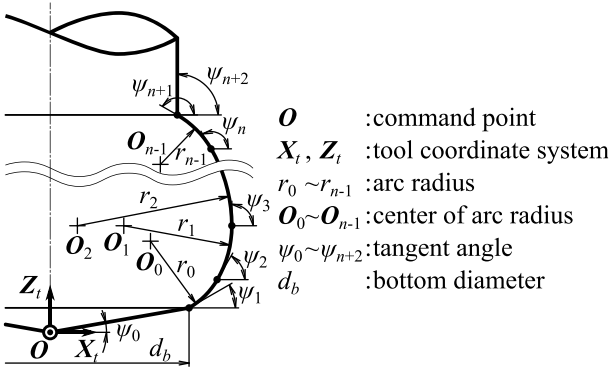


Fig. 3 New tool-geometry data format¹²⁾.

ブ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いる¹¹⁾。課題としては、工具タイプごとに指令点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。あらゆる形状の異形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指令点を算出できることが望ましい。

この課題に対して我々は、あらゆる形状の仕上げ用異形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した¹²⁾。Figure 3のように、DIN 66215¹³⁾規格による工具形状定義を拡張して複数個の円弧を定義可能にすることで、複雑な形状を持つ異形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した。提案する工具形状データフォーマットに基づくことで、単一の計算式で指令点を求められることを示した。汎用的なデータフォーマットと指令点の計算法によって、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った。

本研究の目的は、仕上げ加工用の異形工具を、従来の工具と同様に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。本報では、異形工具に対して2次元C-Space法を適用した工具経路の生成法を示す。工具干渉や、異形工具における不適切な切れ刃Rに対応する工具姿勢の情報が反映されたC-Spaceを利用することで、異形工具の適切な切れ刃に対応した干渉のない工具姿勢の決定が可能となる。最後に、加工シミュレーションと加工実験を行い、提案する手法の有用性について検証した結果を示す。

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、isoparametric法について言及する。加工対象の曲面は

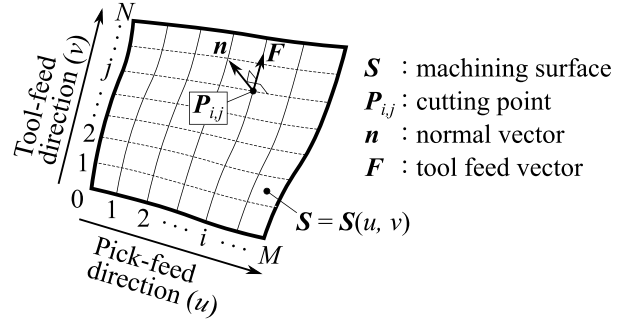


Fig. 4 Definition of machining surface and cutting point.

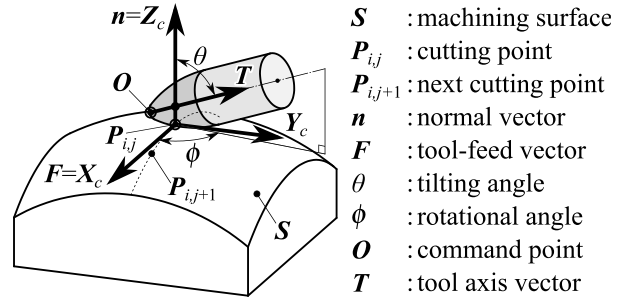


Fig. 5 Definition of tool posture in the cutting-point coordinate system.

CADソフトウェアによってNon-Uniformed Rational B-Spline (NURBS)¹⁴⁾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 4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_{ij} 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 n は、次の式(2)で求められる。

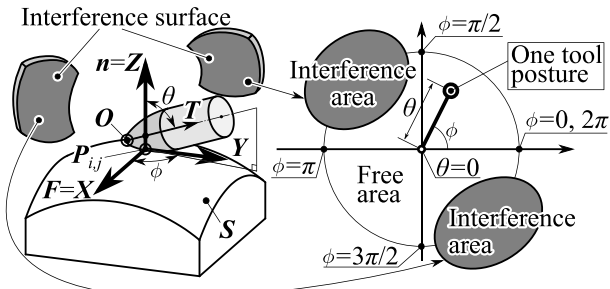
$$n = \frac{\frac{\partial S}{\partial u} \times \frac{\partial S}{\partial v}}{\left| \frac{\partial S}{\partial u} \times \frac{\partial S}{\partial v} \right|} \quad (2)$$

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

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

ここで、 $R(x, \alpha)$ は、ベクトル 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、 $P_{i,j+1}$ は、切削点 P_{ij} に対して隣接する次の切削点を示す。

Figure 5に示すように、切削点 P_{ij} を原点とし、工具送り方向を X 軸、法線ベクトル n の方向を Z 軸、 X と Z の外積を 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 P_{ij} における工具姿勢は、工具軸ベクトル T で表される。 T は Z 軸に対する傾斜角 θ



Tool posture in real space. 2-dimensional C-Space.

Fig. 6 Conventional definition of the 2D C-Space⁵⁾.

と、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 T は、以下の式(4)で求めることができる。

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

3. C-Space の定義と異形工具に応じた拡張

切削点座標系における 2 次元コンフィギュレーション空間 (C-Space) の構成を Fig. 6 に示す。C-Space 内の 1 点は、原点からの距離 θ と原点周りの回転角度 ϕ の 2 つのパラメータによって表される。 θ と ϕ は、Fig. 6 の実空間と C-Space においてそれぞれ対応しているため、C-Space 内の 1 点は 1 つの工具姿勢を表すことになる。この C-Space 内には、工作物と干渉するような不適切な工具姿勢に対応する干渉領域が存在する可能性がある。この干渉領域を C-Space から取り除いて残った領域を「自由領域」と呼ぶ。本研究では、C-Space の各領域を離散化して干渉計算を実行することで、干渉領域と自由領域を分類する。

切れ刃 R が複数ある異形工具の場合、Fig. 7 における Small R のように、仕上げ加工には不適切な切れ刃が存在することがある。Small R で切削すると、Fig. 1 において期待されるような高い生産性が得られない。このような切れ刃に対応する工具姿勢を C-Space 上に反映することで、自由領域はさらに絞り込まれる。この絞り込みにあたっては、文献¹²⁾で提案した工具情報のうち、接線角 ψ によって領域を分割すればよい。

こうして得られた自由領域内の工具姿勢を出力する CL データの候補として用いることで、干渉が無く、さらに仕上げ加工に適切な切れ刃に対応する工具姿勢を決定することができる。

4. ケーススタディ

ここでは、提案する手法の有用性を確認するために行った加工シミュレーションと加工実験の検証結果を示す。

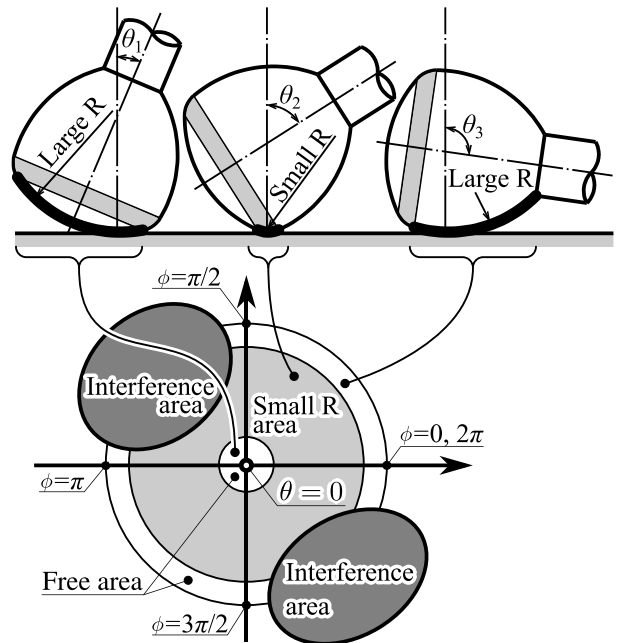


Fig. 7 Extended definition of the 2D C-Space.

Small R areas that are not appropriate for finishing are removed from the C-Space.

4.1 実験の条件

今回のケーススタディに使用する工具として、OSG 社製のフライス工具「PolyBall¹⁵⁾」を選定した。この工具は、Fig. 8 に示すように、Large R と Small R が交互に配置された複雑な形状を持つ。Large R の半径は、工具径に対して非常に大きく設計されている。非常に複雑な工具形状であるため、CAM オペレーションの難易度が高い。今回選定した PolyBall (呼び: PFB120-PB-ST) は、Large R が 24[mm]、Small R が 1.2[mm] である。シャンクに取り付けた外観を Fig. 9 に示す。

加工対象形状は、Fig. 10(a) に示すように、滑らかに曲がる R24 の溝形状とした。これは、R24 の切れ刃を持つ PolyBall であれば、カスプ高さがゼロとなる形状である。対象とする工程は、仕上げ加工である。工具経路は、加工面の全域でダウンカットとなるように Fig. 10(b) の矢印のような工具送りを設定した。加工に使用した工作機械は、DMG MORI NMV 5000 DCG である。その他の加工条件を Table 1 に示す。

提案する異形工具の形状データフォーマットと、工具経路生成法のソフトウェア上の実装にあたっては、オープンソース CAM カーネル Kodatuno¹⁶⁾ を利用した。Kodatuno は、CAD データに基づいて NURBS 曲面に関する演算処理を提供する。開発言語は C++ である。

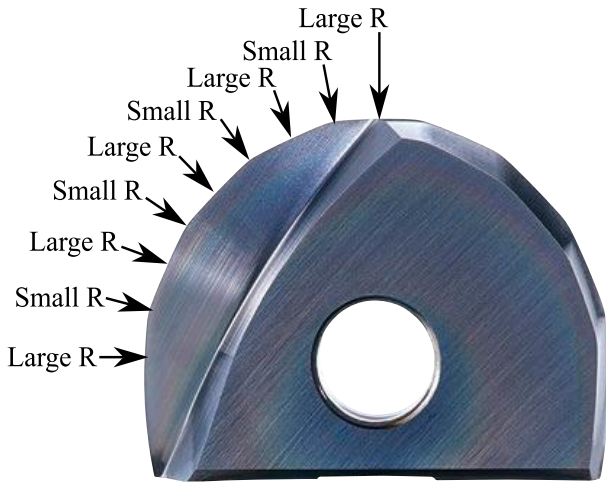


Fig. 8 Complex shape tool “PolyBall”¹⁵⁾ produced by OSG Corporation.

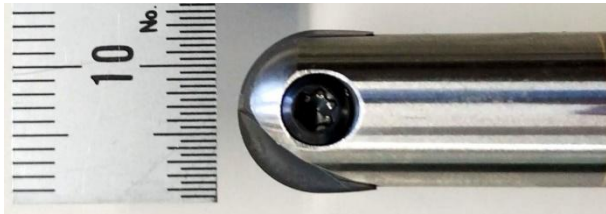
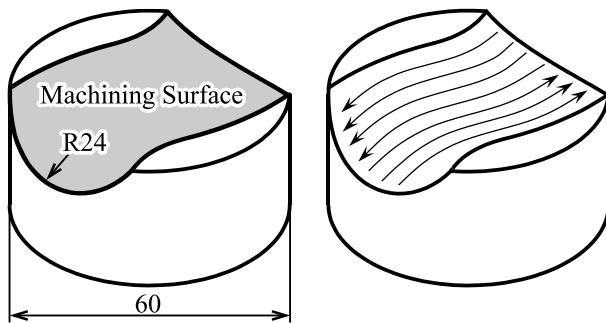


Fig. 9 Appearance of the mounted shank and insert used in experiment.



(a) Workpiece dimension (b) Tool feed direction

Fig. 10 Target shape and tool-feed direction for the case study.

Table 1 Machining conditions		
Workpiece material	S50C (JIS B 4051)	
Cutting speed	m/min	200
Feed rate	mm/min	500
Depth of cut	mm	0.1
Pick feed	mm	0.6

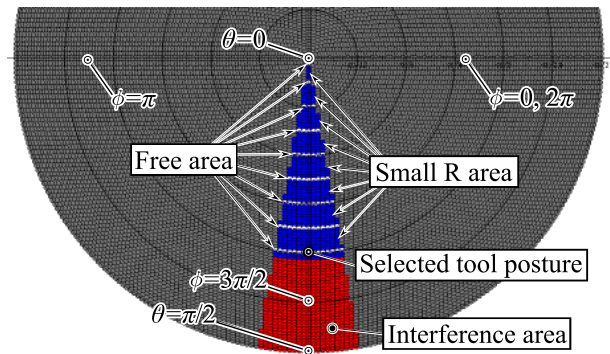


Fig. 11 Calculated C-Space in the center point of the machining surface.

4.2 工具経路の生成

2 次元 C-Space を用いることにより、干渉を回避しながら、異形工具の適切な切れ刃 R を利用する工具経路生成が可能となる。このケーススタディでは、PolyBall 向けの加工戦略として、次の 4 つの条件を設定して工具経路の生成を試みた。

1. 干渉が無い
2. 常に Large R が加工面に接する
3. 全域でダウンカット
4. 各切削点で切削速度が最大

工具姿勢の計算範囲は、傾斜角 $0 < \theta < \pi/2$ 、旋回角 $\phi = 3\pi/2 \pm \pi/18$ とした。傾斜角の範囲は、工具の使用可能範囲である。また、旋回角の範囲は、フランク加工においてダウンカットとなる条件を満たす範囲とした。この計算範囲において、分解能 1 度の離散的な計算を行った。

Figure 11 に、ワーク中央部で計算された C-Space を示す。傾斜角 θ が約 $\pi/3$ 以上となる範囲が干渉領域として計算され、工具が傾斜することで干渉が生じることが示されている。また、PolyBall は、加工に用いる Large R (R24) と不適切な Small R (R1.2) の切れ刃部が交互に配置されているため、C-Space 上の Small R の領域は縞状に現れる。これらの干渉領域と Small R の領域を C-Space から取り除くことで、自由領域は縞状に絞り込まれた。自由領域内から 1 点を選択することにより、干渉がなく、Large R の切れ刃で加工面に接する工具姿勢を得ることができる。今回は、自由領域内で傾斜角 θ が最も大きく、旋回角 ϕ が $3\pi/2$ に最も近い工具姿勢を最終的な工具姿勢とした。この $\phi = 3\pi/2$ とは、送り方向に直交するため、カスプ高さを最小にできる工具姿勢に対応する。以上の手順によって、目的の加工戦略を満足する工具経路が自動的に決定される。

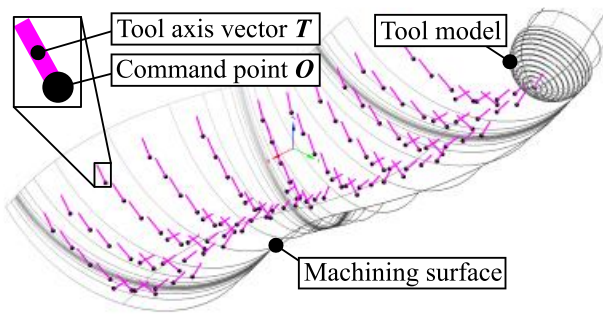
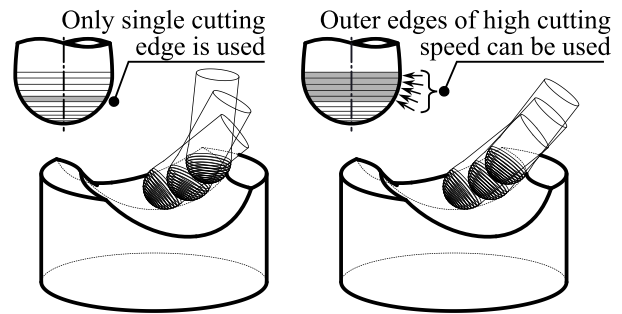


Fig. 12 Generated CL data.



(a) Conventional CAM (b) Proposed method
Fig. 14 Advantage of proposed method compared to conventional CAM.

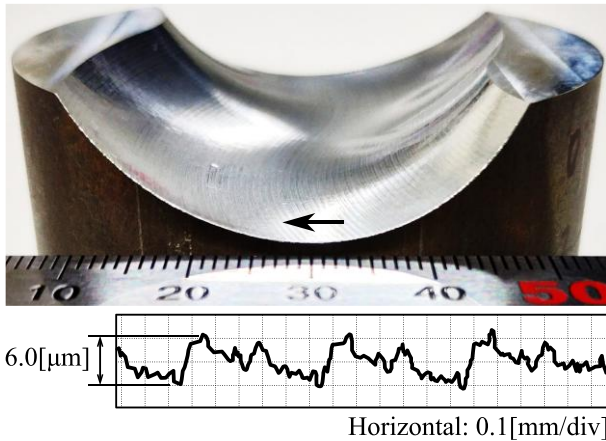


Fig. 13 Result of machining experiment. The arrow in the picture indicates the surface roughness measuring point.

加工面上のすべての切削点に対して C-Space を計算し、結果として得られた CL データを Fig. 12 に示す。実際の切削点はさらに密に配置しているが、一部の CL データのみを示している。切削速度が最大となる工具姿勢が切削点ごとに選択された結果、工具軸ベクトル T が加工面に沿って大きく傾斜していることがわかる。

4.3 加工実験の結果

加工後の仕上げ面の写真と表面粗さの測定結果を Fig. 13 に示す。触針式表面粗さ測定機として、ミットヨ製 SURFTEST SV-2100 を用いた。切削速度が最大かつ Large R の切れ刃部で接する工具姿勢で加工した結果、光沢のある滑らかな外観を得ることができた。ピックフィード方向の表面粗さは、 $R_z 6.0 \mu\text{m}$, $R_a 1.1 \mu\text{m}$ であった。この値は、切削加工としては良好な数値であるといえる。例えば、厳しい表面粗さが求められるタービンブレードでは、 $R_a 3 \mu\text{m}$ が要求値である¹⁷⁾。我々の加工結果は、この要求さえ十分に満足する。

以上の結果から、複雑な形状の PolyBall を用いた加工について、提案手法により戦略的な工具経路を生成することが可能であることが確かめられた。

4.4 一般の CAM ソフトウェアに対する優位性

提案する工具経路生成法を、使いやすさおよび加工品質の観点から、市販の CAM ソフトウェアと比較する。

まず、使いやすさの観点からの優位性を述べる。一例として、市販の Mastercam¹⁸⁾ においては、2025 年現在、加工面の法線ベクトルに対する傾斜角をオペレータが直接指定することで、PolyBall のような複雑な形状の工具を扱うことが可能である。しかしながら、法線ベクトルを正しく入力するためには、オペレータは工具の形状を熟知する必要がある。現状では、複雑形状の異形工具は容易に取り扱うことができない。一方、今回開発した工具経路生成法においては、工具形状データフォーマットと C-Space に基づいて、工具姿勢が自動的に決定される。オペレータは、工具の形状を意識することなく、加工戦略に基づいた工具経路を自動的に得ることができる。

さらに、加工品質面の観点からの優位性を述べる。前述の通り、市販の CAM ソフトウェアでは、加工面の法線ベクトルに対して一定の傾斜角を指定することで異形工具を利用する。つまり異形工具において、切削点ごとに工具姿勢を変化させるような戦略的な工具経路生成は実現できない。今回のケーススタディのような溝形状の加工では、工具を大きく傾斜させると、ワークとシャンク部が干渉する。加工面の全体で干渉を回避するためには、Fig. 14(a)のように工具姿勢を立ち上げる必要がある。切削点によっては、より切削速度が速い工具の外周側が使える余地がある。

一方、今回開発した工具経路生成法では、各切削点の C-Space に基づいて、切削速度が最大となる最も傾斜した工具姿勢が決定される。結果として Fig. 14(b)に示すように、切削点ごとに切削速度が最大となる、深く傾斜した工具姿勢を決定することが可能となる。C-Space を用いることで、切削点ごとに工具姿勢をコントロールすることができ、より自由度の高い工具経路の生成が可能となる。

5. おわりに

本研究では、仕上げ加工用の異形工具を従来のボールエンドミルと同様に戦略的に利用するため、工具経路生成手法の開発を目的とした。異形工具に対して 2 次元 C-Space 法を適用し、工具経路を生成する手法を示した。2 次元 C-Space 法により、切削速度を最大化する加工戦略に基づき、干渉のない工具姿勢を自動的に決定できた。さらに、加工実験によって本手法を検証した。複雑形状の PolyBall を対象としたケーススタディにおいて、切れ刃が加工戦略通りに位置決めされ、適切な加工が可能であることを確認した。以上より、提案した工具形状データフォーマットと C-Space に基づく工具経路生成手法により、異形工具における戦略的な工具経路生成が実現された。

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, *International Journal of Automation Technology*, 2017, 11, 140–154.
- 2) Y. Takeuchi, H. Shimizu, T. Idemura, T. Watanabe and T. Ito, *Journal of The Japan Society for Precision Engineering* **56** [11], 2063 (1990).
- 3) M. Inui, S. Taguchi and N. Umezumi, *Comput Aided Des Appl* **20** [4], 689 (2023).
- 4) J. Kaneko and K. Horio, *International Journal of Automation Technology* **5** [5], 729 (2011).
- 5) K. Morishige, K. Kase and Y. Takeuchi, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **13** [6], 393 (1997).
- 6) K. Morishige and M. Kaneko, *International Journal of Automation Technology* **5** [3], 412 (2011).
- 7) A. Warkentin, F. Ismail and S. Bedi, *Comput Aided Geom Des* **17** [1], 83 (2000).
- 8) Z. Yu, C. Zhi-Tong, Z. Yun and N. Tao, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **93** [5–8], 1791 (2017).
- 9) Ltd. MOLDINO Tool Engineering, GALLEA series High Efficiency Finishing Special Shape Tool Series, https://data.moldino.com/catalog_pdf/gallea.pdf.
- 10) EMUGE-FRANKEN, .
- 11) T. Suzuki, K. Okamoto and K. Morishige, *International Journal of Automation Technology* **15** [6], 885 (2021).
- 12) 岡本 謙, 森重功一, 長野県南信工科短期大学校紀要 **8**, 8 (2025).
- 13) DIN, *DIN 66215-1: Programming of numerically controlled machines; CLDATA, general structure and record types* (1974).
- 14) L. Piegl, *IEEE Comput Graph Appl* **11** [1], 55 (1991).
- 15) OSG Corporation, Variant Shape Tool for Finishing VU-R Series, https://www.osg.co.jp/media_dl/flier/file/c_93.pdf.
- 16) K. Takasugi, T. Kumasaka and N. Asakawa, in *Proc. of the 6th Int. Conf. on Leading Edge Manufacturing in 21st Century* (2011) p. 3354.
- 17) A. A. A. Gamil, T. Nikolaidis, J. A. Teixeira, S. H. Madani and A. Izadi, *Proceedings of the ASME Turbo Expo* [DOI:10.1115/GT2020-16336].
- 18) LLC. CNC Software, Mastercam, <https://www.mastercam.com/>.

【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2）

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 (No. 2)

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 \mathbf{k} との間の関係 $\omega(\mathbf{k})$ 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測定装置・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 \mathbf{k} , that is $\omega(\mathbf{k})$. 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 functions of polar phonon modes in the ferroelectrics, those of a carrier in metals and semiconductors, and Boson peaks in the amorphous materials. Next, regarding dispersion relation we discuss cutoff frequency in a rectangular wave guide, bandgap in a photonic crystal, and 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.

1. まえがき

受理 2025年9月7日

採択 2025年9月29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

本稿の前半（その1）ではテラヘルツ時間領域分光法の原理とそれを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解説した。複素誘電関数の決定については誘電体の極性フォノンの誘電関数とアモルファス特有のボゾンピークの測定例を中心に議論した⁵⁾。

この後半（その2）では、分散関係 $\omega(\mathbf{k})$ について、典型的な例として、「矩形導波管中の電磁波の伝播特性と遮断モード」、「フォトニック結晶におけるバンドギャップと欠陥の導入による局在モードの出現」、そして「強誘電体中の電磁波と格子振動とフォノン・ポラリトン

ン」の3つの測定結果について紹介し、その特性について議論する。

4.2 分散関係

電磁波の振動数と波数ベクトルの間に成り立つ分散関係 $\omega(k)$ は媒質中の電磁波の伝播特性を的確に表している。電磁波は周囲から何も制約がない真空中では波数 k と振動数 ω の間の関係は、 $\omega = ck$ 、すなわち傾きが光速 c の直線となる。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、

$$\omega = (c/n)k \quad (2-1)$$

と表される傾き c/n の直線となる。これは光線 (Light line) と呼ばれている。

ところが、周囲を金属 (理想的には完全電気伝導体) で囲って伝搬の自由を制限したり、伝播する媒質の屈折率 (誘電率) に周期性等の空間構造を導入したりすると電磁波は自由には伝播できなくなる。また、電磁波の電場は媒質中の荷電粒子と強く相互作用する。このため、電磁波は媒質それぞれの構造やそれを構成する原子や分子の電子状態を反映した独自の伝播形態をとる。逆に、実験により分散関係を求めて媒質の構造や電子状態を推測することができる。さらに進めて、人工的な構造物により電磁波の伝播特性を制御することも可能となる。

ここでは、最初に金属の壁により伝播の自由度を制限された例として「矩形導波管」、次に異なる誘電率の誘電体を周期的に配列した「フォトニック結晶」による電磁波の伝播特性の制御、そして最後に誘電体中を進行する電磁波の電場が分極を伴う格子振動である極性フォノンと相互作用した結合波である「フォノン・ポラリトン」の測定例を紹介し、それぞれの場合の電磁波の伝播特性について議論する。

4.2.1 矩形導波管

導波管とは、マイクロ波領域の電磁波の電波方向を比較的用意に制御するための中空の金属の長い空洞で、その断面の形状によって、矩形 (方形) や円形などが開発されている。導波管中の電磁波の伝搬特性は、波長に比べてサイズの大きな「自由空間」と見なせる空間の伝搬とは異なり、かなり制限された特殊な様相を示す。矩形

導波管内の電磁場の空間分布、すなわち電磁波が与えられた境界条件下でどのように伝播 (電磁場の空間的・時間的に変化) して行くかは、マクスウェルの波動方程式を与えられた境界条件下で解いて求めなければならない。電磁波の伝播状態を表す空間的・時間的特性 (モード) については、多くの教科書が刊行されているのでそれらを参考にされたい²⁶⁻²⁸⁾。

ここでは、最も単純な導波管の例として矩形導波管の測定結果を紹介する。Figure 2-1 に矩形導波管の概念図を示す。電磁波は自由空間や同軸ケーブルの内部では、電場も磁場も進行方向のベクトル成分を持たず、全て進行方向に垂直な平面内の成分しか持たない平面波である TEM 伝送波となる。一方、矩形導波管の中を伝わる伝送波は、電場か磁場かのどちらかが進行方向のベクトル成分を持つ TE_{nm} 波もしくは TM_{nm} 波となる。TE_{nm} 波は進行方向に電場 (E) を持たず、逆に TM_{nm} 波は進行方向に磁場 (H) を持たないモードである。ここで、添え字の nm は電場強度が断面の長方形の長軸の x 方向に n 周期変化し、磁場強度は短軸の y 方向に m 周期変化していることを表している。

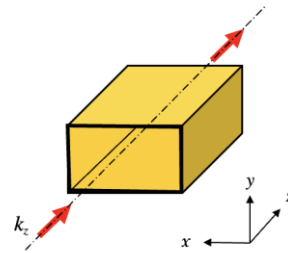


Fig. 2-1 Schematic drawing of rectangular wave guide.

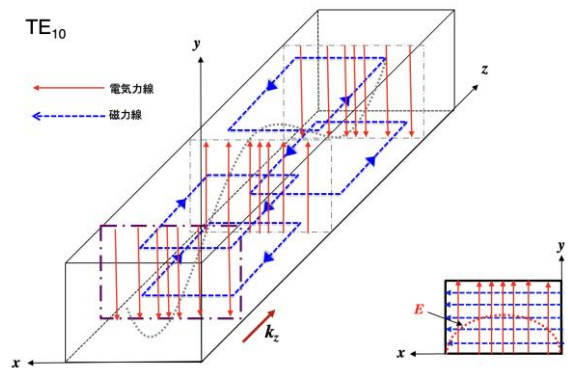


Fig. 2-2 Schematic drawing of electric and magnetic fields of TE₁₀ modes. Electric field changes one period along x -axis and do not change along y -axis.

Figure 2-2 に進行方向を z 方向とした TE_{10} モードの電磁場の空間分布の概念図を示す。添字の 10 は電場強度が x 方向に 1 周期変化し ($\lambda_x = 2a$)、磁場強度は y 方向には変化しないこと ($\lambda_y = \infty$) を表している。また、導波管の中にはこの TE_{10} モードの他に多数の高次モードも存在する。

導波管では、モードごとに伝搬できる電磁波の振動数に制限がある。導波管の特定のモードで伝播可能な振動数の下限をそのモードの遮断振動数 ω_c (カットオフ: cut-off frequency) という。その周波数の自由空間中での波長を遮断波長 ($\lambda_c = c/\omega_c = 2\pi c/\omega_c$) という。遮断波長は以下の式で求められる。

$$\lambda_c(\text{nm}) = \frac{2\pi}{k_c(\text{nm})} = \frac{c}{v_c(\text{nm})} \quad (2-2)$$

ここで、 v は電磁波の振動数であり、 k は単位長さ当たりの波の数を表す波数である。また、 k_c は辺の長さがそれぞれ a と b の矩形導波管における TE_{nm} 伝送波の遮断波数で以下の式で与えられる。

$$k_c(\text{nm}) = \sqrt{\left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{b}\right)^2} \quad (2-3)$$

TE_{10} モードでは、 $n=1$ で $m=0$ であるから $k_c = \pi/a$ となるから、遮断波長 $\lambda_c = 2a$ であり遮断振動数 $\omega_c = c/2a$ となる。すなわち、導波管の断面の差し渡しの 2 倍の波長以下の波長の電磁波は透過するが、2 倍以上の波は透過できずに遮断される。また、導波管の断面寸法が同じであれば、 m や n の値が大きくなる高次モードでは遮断波長は m や n に逆比例して短く (振動数は比例して高く) なることが分かる。

矩形導波管内の電磁波の分散関係 $\omega(k)$ はマクスウェルの波動方程式を与えられた境界条件下において解いて、

$$\omega(k_z) = c\sqrt{k_z^2 + k_c^2} \quad (2-4)$$

となる。ここで、 ω は電磁波の角振動数、 k_z は z 方向に進む波の波数である。この物理量をマイクロ波工学の分野では z 方向位相定数と呼び、 β と表示することが多いが、この解説では波数であることを明示するために k_z を用いることとする。

Figure 2-3 に分散関係 $\omega(k)$ の概念図を示す。波数 $k_z = 0$ の y 切片で遮断振動数 ω_c を持つ式 (2-4) で表される無理関数である。

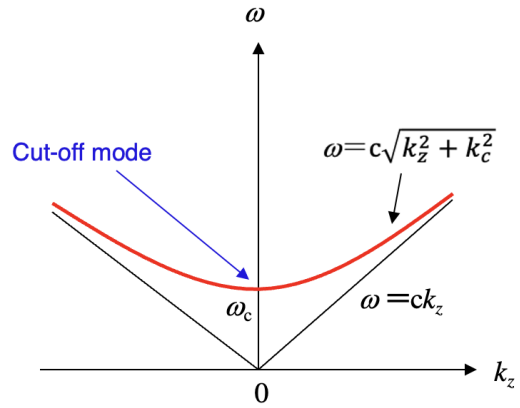


Fig. 2-3 Schematic drawing of dispersion relation $\omega(k)$ in rectangular waveguide.

Figure 2-4 に遮断モードの概念図を示す。遮断モードは $k_x = k_c$ であり z 方向の波数をもたない。つまり、導波管内を進行しないで入口付近で導波管の内壁の間で反射を繰り返す局在モードと考えられる。

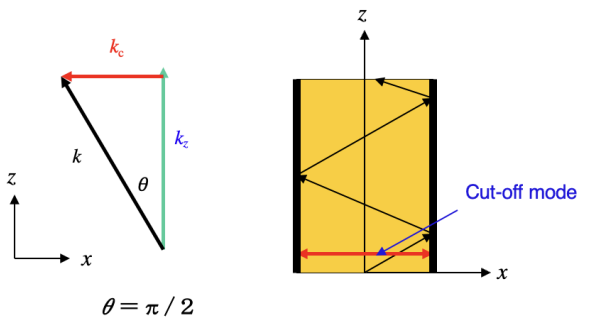


Fig. 2-4 Schematic drawing of cut-off mode in rectangular waveguide. Cut-off mode reflect between walls of waveguide and does not propagate along z -axis.

Figure 2-5 に THz-TDS で測定した空洞部分の断面が縦横 $1.0 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm}$ の正方形の真鍮製矩形導波管の透過スペクトルを示す。透過率からは 5.0 cm^{-1} 以下の低振動数領域では全く透過しないことが確認できる。 5.0 cm^{-1} 以上の領域では 5% 前後の透過率を示している。こ

の導波管の TE_{10} モードの遮断波長 λ_c は式 ($\lambda_c = 2a$) から導波管の差し渡しの2倍である $\lambda_c = 2.0 \text{ mm}$ となる。したがって、遮断角振動数 ω_c の計算値は、 $\omega_c = 5.0 \text{ cm}^{-1}$ ($k_c = \omega_c / c$) となり実験結果と一致する。

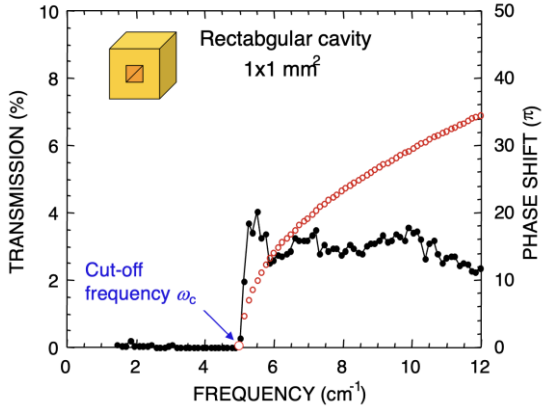


Fig. 2-5 Transmission intensity and phase shift spectra through rectangular waveguide ($a = b = 1.0 \text{ mm}$) measured by THz-TDS. Black circles show intensity and red ones show phase shift.

一方、位相シフトは 5.0 cm^{-1} から急速に立ち上がりその後は緩やかに増加するスムーズな曲線を描いている。また、 ω_c での勾配が垂直であることから、式 (1-10) よりこの振動数のモードの群速度が0となり、局在モード（遮断モード）であることが確認できる。矩形導波管を伝播する電磁波の分散関係は式 (1-4) で表される無理関数であり、振動数が高くなるに従って漸近線である光線 (light line : $\omega = c k$) に近づいてゆくはずであるが、

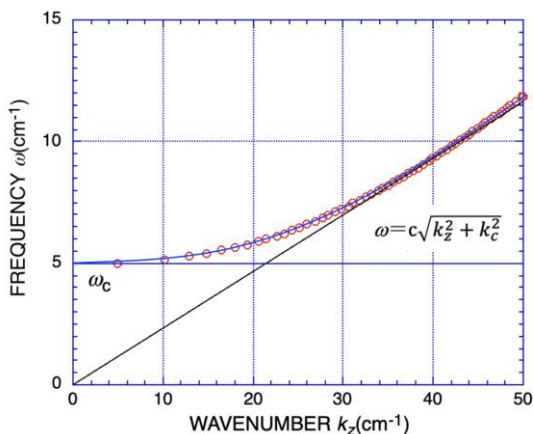


Fig. 2-6 Dispersion relation of rectangular waveguide. Red circles show results estimated from phase shift spectrum, blue line show irrational function with cut-off frequency of $\omega_c = 5.0 \text{ cm}^{-1}$, and black one is light line, respectively.

Fig. 2-5の位相シフトは、 10 cm^{-1} 以上の高振動数側で漸近線から離れてゆくように見える。この原因は、位相シフトを導出する過程で厚さ d の試料の厚さ分の光路差の補正をしていないためである。

屈折率 n の媒質中の波数 k は式(2-1)より、

$$k = n(\omega/c) \quad (2-5)$$

で表されるが、実際の測定では位相シフトに厚さ d の試料がなかった場合の補正を入れて、

$$\begin{aligned} \phi(\omega) &= \theta_{sam}(\omega) - \theta_{ref}(\omega) \\ &= \frac{\omega}{c} \{n(\omega) - 1\} d \quad (2-6) \end{aligned}$$

となる。したがって、この関係から測定結果より分散関係を導出するには式 (2-5) と (2-6) より得られた式 (2-7) の左辺第2項の ω/c の補正項を加える必要がある (本稿その (1) の式(1-9)と同じ)。

$$k(\omega) = \frac{\phi(\omega)}{d} + \frac{\omega}{c} \quad (2-7)$$

Figure 2-6に THz-TDS 測定より求めた位相シフトスペクトルに、式 (2-7) の補正を加えて算出した分散曲線を赤丸で、式 (2-4) の無理関数を青色の実線で、漸近線である光線を黒の実線で示した。誘電分散 $\omega(k)$ の y 切片で遮断振動数 $\omega_c = 5.0 \text{ cm}^{-1}$ を持つ無理関数である式 (2-4) より求めた計算結果は波数 45 cm^{-1} 以下の低波数領域では測定結果を再現していることが分かる。

ただし、 45 cm^{-1} (振動数 $\omega = 10 \text{ cm}^{-1}$) 以上の高波数領域では上記の補正を加えても理想的な漸近線である光線 ($\omega = c k$) よりも少し高い振動数を示す (位相の遅れが鈍化する) 傾向がある。この測定に用いた試料はバルク状の真鍮の立方体に放電加工により四角柱の穴を穿ち導波管としたことにより、その角柱の角の部分が放電加工に用いたワイヤーの断面の丸みの影響が残っており、正確な直角を成していない。このため透過電磁波の波長が短くなる振動数 $\omega = 10 \text{ cm}^{-1}$ 以上では直角の角を持つ理想的な矩形導波管の分散関係を満たさなくなるためと考えられる。

4.2.2 フォトニック結晶

4.2.2(a) フォトニックバンド

電子の運動状態を記述するシュレージンガー (Schrödinger) の波動方程式と電磁波の伝播特性を記述するマックスウェル (Maxwell) の波動方程式は、それぞれ以下のように書き表される。

シュレージンガーの波動方程式

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}) \right] \phi(\mathbf{r}) = E\phi(\mathbf{r}) \quad (2-8)$$

マックスウェルの波動方程式

$$\left[-\nabla^2 + \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \epsilon(\mathbf{r}) \right] \mathbf{E}(\mathbf{r}) = \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}) \quad (2-9)$$

ここで、 \hbar はプランク定数、 m , $V(\mathbf{r})$, $\phi(\mathbf{r})$ および \mathbf{E} は電子の質量、ポテンシャルおよびエネルギーである。また、 $\epsilon(\mathbf{r})$ と $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ は媒質の誘電率と電磁波の電場を表している。電子の波動関数 $\phi(\mathbf{r})$ に対応するのが電磁波の電場 $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ もしくは磁場 $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ である。また、電子は周囲の相互作用を集約したポテンシャル $V(\mathbf{r})$ によって運動が制御されるが、電磁波では誘電率の空間分布 $\epsilon(\mathbf{r})$ がこれに対応している。

屈折率の異なる複数の誘電体を電磁波の波長と同程度の周期で並ぶように構成した人工周期構造体 (結晶) 中の電磁波は、原子が周期的に配列した金属結晶中の電子の波動関数と同様に周期境界条件下のブロッホ状態となる。その結果、電磁波はフォトニックバンドを形成する。誘電率の絶対値およびそのコントラストを適切に選べば、周期の2倍に対応する振動数付近に電磁波モードが存在しないバンドギャップを作り出すことができる。また、結晶構造をその逆格子がなるべく等方的になるように考慮すれば全方位に共通するバンドギャップを実現することが可能である。共通するギャップ領域の振動数を持つ電磁波はこの結晶中に存在しえないため、共通バンドギャップを持つ3次元フォトニック結晶はギャップ領域の振動数を持つ全ての方向からの電磁波を全反射する。逆に、この結晶内からはバンドギャップ領域の電磁波を発信 (発振) することも全く不可能となる興味深い現象も出現する²⁹⁻⁴⁵⁾。

電子のエネルギーバンドにおいては、原子の大きさや結晶を構成するときの原子間距離と言う固有のサイズが元々存在する。一方、フォトニックバンドにはそのような制約が存在しない。このため、電磁波の波長

と結晶格子の周期 (格子定数) との間にはスケールング則が成り立つ。

また、半導体の電子バンドの場合は結晶中に対応する構成原子と異なる電荷をもつ不純物を混入させてドナーやアクセプター準位を出現させることができる。フォトニック結晶においても、結晶中に不純物や欠陥を導入して周期を乱すことにより、ギャップ領域に不純物準位を作り出すことが可能である。この不純物準位の電磁波は不純物や欠陥の周りに電場や磁場が局在したモードとなる。このことを利用すれば、「光の局在」が実現可能となる。

このようなフォトニックバンドの概念は1979年に千葉大学の大高一雄教授によって提唱された²⁹⁾。その後、1987年に E. Yablonovitch がマイクロ波領域でダイヤモンド構造を持つ人工構造体を用いて実証したことで一躍注目が高まった³⁰⁾。続いて、同じ年に S. John が局在モードを利用して光の局在の研究成果を発表した³¹⁾。これらを契機として世界中で応用分野も含めて研究が急速に活発になった。

日本では井上久遠教授が1990年代にフォトニック結晶による電磁波の制御に着目し、科研費の「重点領域研究」に大高教授等と提案した。当時、信州大学の教養部にいた著者のひとりの武田も井上教授とガラス板に多数の円筒状の穴を周期的に開けたキャピラリープレート試料の透過率を赤外 FTIR を用いて測定し、^{38,39)} この振動数領域で世界で始めてフォトニックバンドギャップを確認していたこともあり、重点研究の計画班に加えていただいた。その後も高抵抗シリコン製の単純立方格子等の研究成果を出すことができた⁴⁰⁾。ここではその研究成果の一部を紹介する。

Figure 2-7(a) に高抵抗シリコン製の単純立方格子の模式図を示す。また、Fig. 2-7(b) に作製に用いたユニットセル (単位胞) のパラメータを示す。試料は THz 領域での誘電率が 11.4 の厚さ 0.40 mm の高抵抗シリコンウエファに結晶軸 (x および y 軸) に対して 45 度の角度に沿ってダイヤモンドカッターを用いて深さ 0.29 mm の溝を周期 0.40 mm で掘り、それらに垂直な z 軸方向からウエットエッチングで一辺の長さが平均 0.29 mm の縦穴となるよう、0.11 mm の四角柱を空けたものを数 10 枚作製した。Figure 2-8(b) に示したそれらを 4 ~ 8 枚程度積層し、Fig. 2-8(c) の写真のような試料を作製した。これにより、 $\{001\}$ 方向および $\{110\}$ の透過スペクトルを測定することが可能でブリルアン帯

の Γ -Z 方向と Γ -M 方向の電磁波伝播特性を決定することができる。

ただし、今回作製した結晶では z 軸方向からはエッチングにより縦穴を開けたため穴の形状は四角柱ではなく四角錐となっている (Fig. 2-7(b)の中央の図を参照)。このため純粋な単純立方格子ではないことから以下は擬単純立方格子と呼ぶ。しかしながら、傾斜のついた部分のサイズは関係する波長の 1/10 以下であり、誤差範囲であることから以下の議論に影響はないものと考えている。

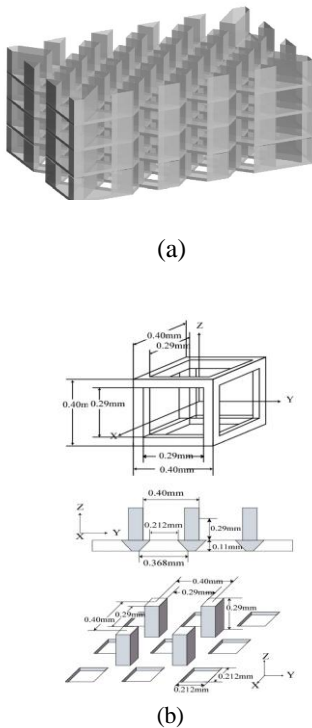


Fig. 2-7 (a) Schematic drawing of pseudo-simple-cubic lattice and (b) its size parameters⁴⁰⁾.

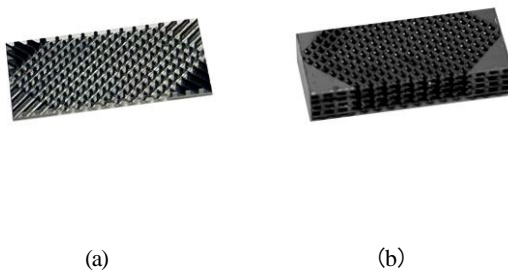


Fig. 2-8 Photograph of pseudo-simple-cubic lattice made of high electric resistivity silicon wafers. (a) single layer and (b) stacked with 4 layers⁴⁰⁾.

単純立方格子のフォトニックバンド構造 (分散曲線) は平面波展開法により計算した。その結果を Fig. 2-9 に示す。出現する各モードは A_1 , A_2 , B_1 , B_2 および 2 重縮退した E の 4 種類の既約表現に分類される。このうち、 B_1 , B_2 および E に属するモードが赤外活性であり、THz-TDS で測定することができる。振動数 $\omega = 10 \text{ cm}^{-1}$ 付近に Γ -Z 方向 (第 1 分枝と第 2 分枝の間) と Γ -M 方向 (第 2 分枝と第 3 分枝の間) に狭いながらも共通のバンドギャップが現れていることが確認できる。

Figure 2-10 に THz-TDS により測定した位相シフトスペクトルから求めたフォトニックバンド構造 (分散曲線) を示す。予測通り既約表現 B_1 , B_2 および E に属するモードが検出されている。

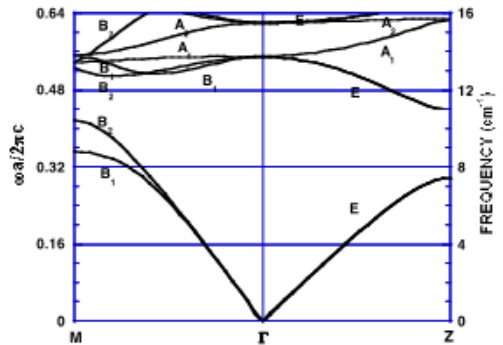


Fig. 2-9 Photonic band structure (dispersion curves) of simple cubic lattice calculated by plane wave expanded method⁴⁰⁾.

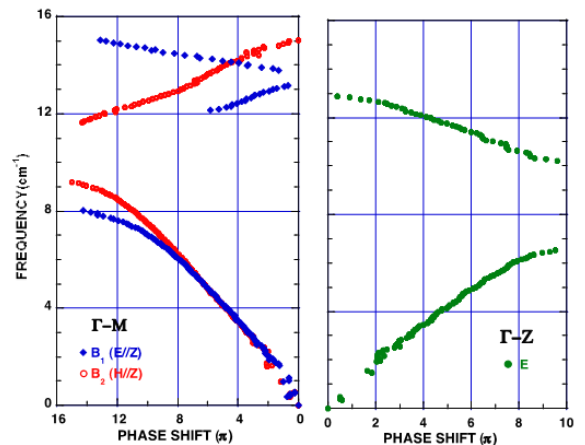


Fig. 2-10. Photonic band structure (dispersion curves) of pseudo-simple-cubic lattice estimated in terms of phase shift spectra. Light side: Γ -M branch measured along $\{110\}$ direction. Right side: Γ -Z branch along $\{001\}$ direction⁴⁰⁾.

測定された各既約表現のモードのバンドの様子は計算結果 (Fig. 2-9) とほぼ一致し, 10 cm^{-1} 付近に共通のバンドギャップが現れていることが確認できる。

バンドギャップの両端では, ブリルアン帯中心の Γ もしくは両端の Z 及び M 点では分散曲線の傾きが水平になっていることが分かる。本解説の「その1」で議論したようにこの傾き ($d\omega/dt = v_g$) は電磁波の群速度を表すことからバンドギャップの両端のモードの群速度が0となっていることが分かる。実際の測定 (Fig. 2-10) からも群速度がギャップに近づくにつれて0に近づいてゆくことが推測される。その逆数である電磁波の状態密度は無限大になってゆくことが予測される。

また, Γ - M 方向では B_1 および B_2 モードの分枝において傾斜が負となっている領域では測定に掛かっていないことが分かる。これは, 傾斜が負ということは電磁波の進行方向が実際の伝播方向と逆になっているため透過測定では検出できないためであり, これらの分枝は反射測定により検出できると考えられる。

4.2.2(b) 局在モード

半導体結晶に母体の原子と電子価数の異なる不純物原子をドーブすると, それらの不純物原子の周囲に電子またはホールが局在することにより結晶格子の周期性が乱される¹⁾。このとき, 適当な条件を満たすと電子バンドのエネルギーギャップ領域にドナー準位やアクセプター準位と呼ばれる不純物準位が出現させることができる。これとの類推から, フォトニック結晶に欠陥を導入して, 結晶性すなわち誘電率 (屈折率) の周期性を適宜乱すと, フォトニックバンドギャップ領域に不純物準位を出現させることができる³⁾。この電磁波は欠陥の周囲に局在することからこの現象を「光の局在」と呼び, その電磁波は不純物局在モードと呼ばれている。

ここでは, 局在モードの例として2次元線欠陥フォトニック結晶における研究結果を紹介する^{44,45)}。Figure 2-11(a)に概念図を示す。実際の試料は, 溝を平行に掘った高抵抗シリコンの平行平板を積層して作製した擬三角形格子の中央の平板を溝の掘っていない単なる平行平板に置き換えている。作製した資料の写真を Fig. 2-11(b)に示す。この結晶のエアロッド (溝) は断面が 0.40 mm 角の正方形の正四角柱でその断面の正方形の midpoint が三角格子を組むように上下隣同士の板を溝周期の位相を π ずつずらして積層してある (Fig. 2-11(b))。シリコン基板の誘電率は 11.4 であり, 格子

定数は 0.57 mm でエアロッドの体積充填率は 0.54 である。上述のように正四角柱の midpoint は正三角形をなすように配置されているが, エアロッドが円柱では出ないため擬三角形格子となっている。Figure 2-11(c)および 2-11 (d)に2次元擬三角形格子の格子ベクトルおよびその逆格子空間の対称性の高い点を示す。

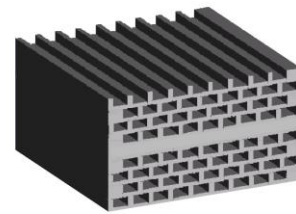
ここで,

$$a_1 = (a, 0), a_2 = (a/2, \sqrt{3}a/2)$$

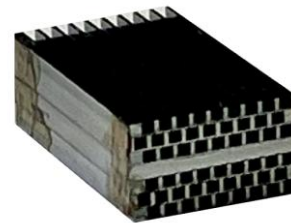
であり,

$$\Gamma = (0, 0), X_3 = (0, 2\pi/\sqrt{3}a), J_1 = (2\pi/3a, 2\pi/\sqrt{3}a)$$

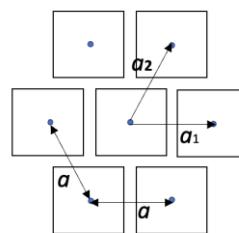
となっている。



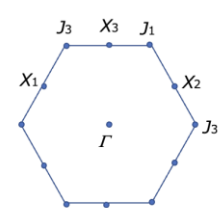
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 2-11 (a) Schematic drawing of 2D pseudo-triangular lattice with plane defect. (b) Photograph of sample made of silicon wafer with grooves. (c) Lattice vectors. (d) Typical Reciprocal lattice points in Brillouin zone of 2D pseudo-triangular lattice⁴⁵⁾.

欠陥の役目を担う中央の溝のない平板を挟んでいる両側の溝のある4枚の平板で構成された部分はフォトニック結晶スラブであるためバンドギャップが存在する。これらの両側のスラブは、ちょうどファブリペロー共振器の高い反射率を持つ鏡であるエタロン板の役割を果たす。中央部分に欠陥として導入された溝のないシリコン平板を中心とした空間に、エタロン板共振器と同じ様に波長がこの欠陥層である平板の厚さのほぼ整数倍の長さを持つ電磁波が定在波モードとなって局在することになる。この局在の強さは電場（もしくは磁場）がいかに長い時間かついかに狭い空間に留まるかで判断する。通常は測定上の制限から時間についての条件である Q 値 (quality value) が用いられている。透過測定の場合、 Q 値は局在モードの固有振動数 ω_{loc} と透過ピークの半値全幅 $\delta\omega$ の比から見積もられる ($Q = \omega_{loc}/\delta\omega$)。欠陥層に局在するモードの Q 値は両側のフォトニック結晶スラブの反射率に依存する。反射率が高い、すなわちバンドギャップ領域の透過率スペクトルの深さが深いほど、局在モードの Q 値は高くなり、電磁波は中央欠陥層部分に強く局在する。また、用いた材質の誘電損失が小さいほど Q 値は高くなる。すなわち、より高い Q 値を実現するには、両側のフォトニック結晶を構成する平板の総数を多くする必要がある。

Figure 2-12 に実際に作製した擬三角形格子フォトニック結晶と同じ格子パラメータを持つ欠陥のない結晶における磁場がエアロッドに平行な偏光方向 (H 偏光) の電磁波の分散関係の平面波展開法による計算結果を示す。エアロッドが円柱でなく四角柱であるため擬三角形格子となっている。

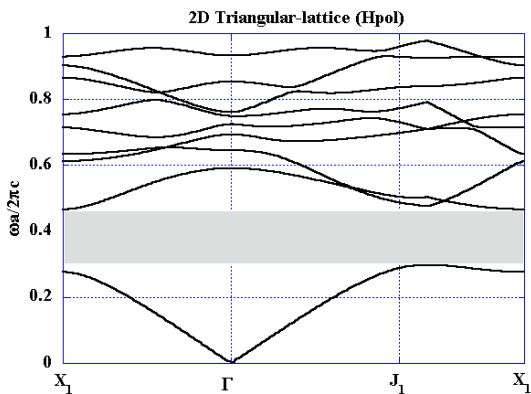


Fig. 2-12 Photonic band structure (dispersion curves) of pseudo-triangular lattice calculated by plane wave expanded method⁴⁵⁾.

このためゾーン境界を表す X および J 点はそれぞれ X_1 および J_1 の様に添字をつけて区別した。振動数 $5.5 \text{ cm}^{-1} \sim 9.0 \text{ cm}^{-1}$ の領域 (規格化した値 $\omega a/2\pi c = 0.30 \sim 0.43$) に比較的広いバンドギャップが出現していることが分かる。

Figure 2-13 に THz-TDS により測定した実際の擬三角形格子フォトニック結晶の透過強度及び位相シフトスペクトルを示す。電磁波の進行方向は欠陥層に垂直な y 軸に平行で、偏光は磁場 H がエアロッドに平行な H 偏光である。振動数 4.5 cm^{-1} から 8.5 cm^{-1} のバンドギャップ領域に 5.9 cm^{-1} と 8.0 cm^{-1} の2本の鋭い透過ピークが確認できる。これらは、面欠陥 (中央の溝のない平板) を導入したことにより出現した局在モードと考えられる。

また、位相シフトスペクトルはフォトニックバンド構造を表し、その勾配の逆数は電磁波の群速度となる。バンドギャップ領域に出現した2本の透過ピークの位相の勾配が急になっていることからこのモードの群速度が極端に遅いことが分かる。このことからこれらのピークは線欠陥 (中央の溝のない平板) に局在している Q 値の高い局在モードであることが分かる。

局在モードの振動パターンを解明するために、Fig. 2-11 に示した格子が周期的に連続する超格子空間考え、欠陥層内に仮想的な振動双極子を置いて数値解析を行った (詳細は河合らの文献 (44) および (45) を参考にされたい)。バンドギャップ領域にはフォトニック結晶格子の対称性を反映して対称性の異なる規約表現に属する複数の局在モードが出現する。Figure 2-14 に各局在モードの磁場振幅の空間分布を示す。⁴⁵⁾

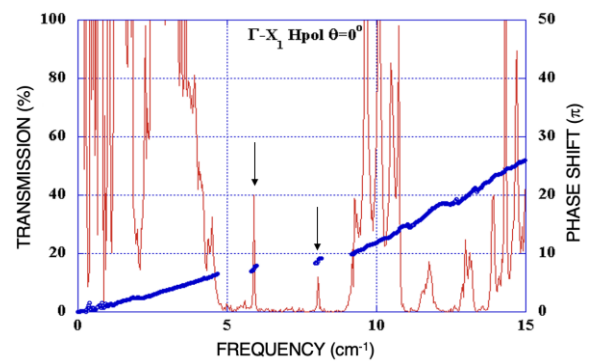


Fig. 2-13 Transmission intensity and phase shift spectra. Sharp peaks at 5.9 cm^{-1} and 8.1 cm^{-1} due to localized defect modes seen in low transmission region between 4.9 cm^{-1} and 9.1 cm^{-1} corresponding to first band gap⁴⁵⁾.

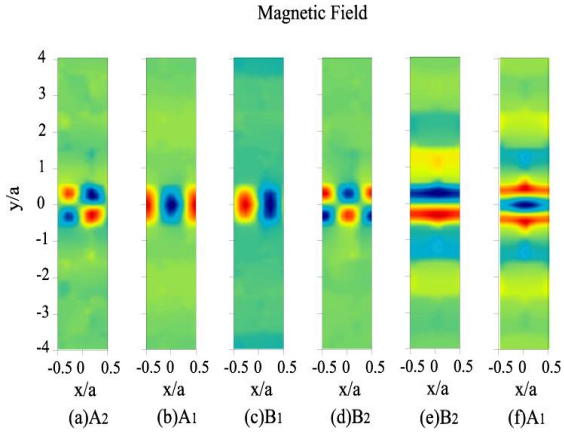


Fig. 2-14 Spatial distribution of magnetic field intensities of localized defect modes⁴⁵⁾.

ここで、 A_1 , A_2 , B_1 および B_2 はそれらのモードが属する既約表現を表す。 A_1 は結晶格子のもつ対称操作のうち欠陥層の中心を通り x 軸に垂直な面に対する鏡映操作 M_x と y 軸に垂直な面に対する鏡映操作 M_y に対してどちらも不変な全対称モードである。 A_2 は M_x に対しては反対称で M_y に対しては対称なモードである。 B_1 は M_x と M_y のどちらに対して反対称なモードである。また、 B_2 は M_x に対しては対称であるが、 M_y に対しては反対称なモードである。いずれの局在モードの磁場強度も欠陥層の両側のフォトニック結晶の領域ではきわめて弱く、中央の欠陥層内に強く局在していることが確認できる。

欠陥層に垂直に入射する平面波すなわち y 軸方向に進む入射波は M_x に対して不変であるが、 M_y に対しては制限がないため、 A_1 と B_2 モードと結合することができる。したがって、線欠陥フォトニック結晶に入射した電磁波は結晶内でこれらのモードと結合波を形成し結晶の反対側から再び平面波となって自由空間に出てゆく。一方、欠陥層に平行に入射する平面波すなわち x 軸方向に進む入射波は M_y に対して不変であるため、 A_2 と B_1 モードのみと結合できる。その方向の透過スペクトルを測定するとバンドギャップ領域に透過ピークとなって出現する可能性がある。

Figure 2-13 に見られる、 5.9 cm^{-1} の透過ピークが(e)の B_2 モードに、また 8.0 cm^{-1} の透過ピークが(b)の A_1 モードに対応している。また、電磁波の入射方向を変えると波数ベクトル依存性を調べることができる。Figure 2-15 に局在モードの振動数の波数ベクトル依存性を示す。

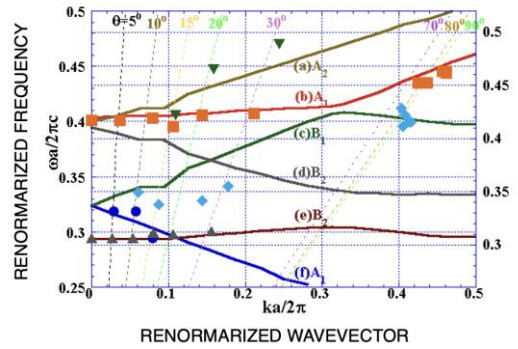


Fig. 2-15 Wavevector dependence of localized defect modes in 2D triangular lattice with defect⁴⁵⁾.

これらの局在モードの質は前述の Q 値によって評価される。面欠陥層を両側から4枚で挟んだ今回の場合では、 $\omega_{oc} = 6.0 \text{ cm}^{-1}$ の B_2 モードの Q 値は、125 程度であり十分高い値といえる。さらに高い Q 値の局在モードを実現するためには少なくとも10格子程度は必要となる(欠陥を囲むフォトニック結晶の格子の数と局在モードの Q 値との関係は著者の一人である Kitahara の博士論文のマイクロストリップラインの節に詳しい。参考にされたい¹²⁾)。

4. 3 フォノン・ポラリトン

誘電体結晶中の電磁波は分極を伴う格子振動と結合してフォノン・ポラリトンを形成する。この結果、結合波であるポラリトンには、横光学 (TO) フォノン振動数 ω_{TO} と縦光学 (LO) フォノン振動数 ω_{LO} の間にバンドギャップを持つ特異な分散関係が出現する。

誘電関数を $\epsilon(\omega)$ として、ポラリトン振動数 ω と波数 k の関係を与える分散式は、屈折率を $n (= \epsilon^{1/2})$ 、光速を c として、 $\omega = ck/n$ から次の式(2-10)で与えられる。

$$\epsilon(\omega) = \frac{c^2 k(\omega)^2}{\omega^2} \quad (2-10)$$

前述のように、波数 (角波数) は $k = 2\pi/\lambda$ であり、試料の厚さを d とすると透過電磁波の位相シフトは $\phi = 2\pi d/\lambda$ となる。解説のその1の3.2節のように、 $k(\omega) = \phi(\omega)/d - \omega/c$ であるから THz-TDS によって $\phi(\omega)$ を測定すれば分散関係 $k(\omega)$ を直接求めることができる。

一方、減衰調和振動子モデルによると極性フォノンの誘電関数 $\epsilon(\omega)$ は N 個の極性フォノンが存在し、 j 番目の TO フォノンおよび LO フォノンの固有振動数と減

衰定数をそれぞれ、 $\omega_{\text{TO}j}$, $\omega_{\text{LO}j}$, $\gamma_{\text{TO}j}$, および $\gamma_{\text{LO}j}$ とすると、

$$\epsilon(\omega) = \epsilon(\infty) \prod_{j=1}^N \frac{\omega_{\text{LO}j}^2 - \omega^2 + i\omega\gamma_{\text{LO}j}}{\omega_{\text{TO}j}^2 - \omega^2 + i\omega\gamma_{\text{TO}j}} \quad (2-11)$$

と記述される。これが良く知られた黒沢の式である⁴⁾。ちなみに、復元力のみで抵抗力が働かない理想的な調和振動の場合は減衰項が無視でき、下記のN個の調和振動子が存在する場合の拡張された有名なLST (Lyddane-Sachs-Teller) の関係式に帰着する¹⁾。

$$\frac{\epsilon(\omega)}{\epsilon(\infty)} = \prod_{j=1}^N \frac{\omega_{\text{LO}j}^2}{\omega_{\text{TO}j}^2} \quad (2-12)$$

式(2-11)と上述の式(2-10)を連立させるとフォノン・ポラリトン分散関係が得られる。

$$k(\omega) = \frac{\sqrt{\epsilon(0)}}{c} \omega \prod_{j=1}^N \left\{ \frac{\omega_{\text{LO}j}^2 - \omega^2 + i\omega\gamma_{\text{LO}j}}{\omega_{\text{TO}j}^2 - \omega^2 + i\omega\gamma_{\text{TO}j}} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2-13)$$

横軸に波数 k , 縦軸に振動数 ω をとって模式的に分散関係をグラフ化した概念図が Fig. 2-16 である。ここでは、低振動数領域に極性フォノンが2種類 ($j=1, 2$) 存在し、それらの減衰が無視できる場合 ($\gamma_{\text{TO}1} = \gamma_{\text{TO}2} = 0$) を描写してある。

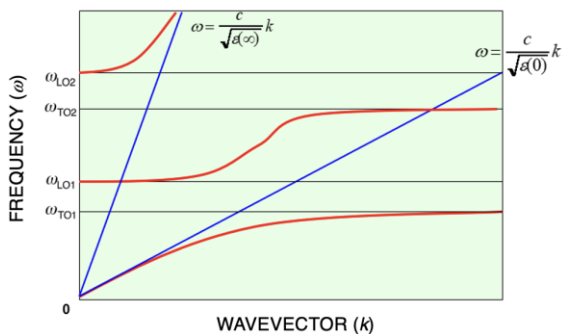


Fig. 2-16 Schematic drawing of phonon-polariton dispersion curves in the case of $N=2$. Red curves are polariton branches and blue lines are asymptotes of polariton branches.

固有振動数 $\omega_{\text{LO}1}$ と $\omega_{\text{TO}1}$ および $\omega_{\text{LO}2}$ と $\omega_{\text{TO}2}$ の間の領域にバンドギャップが出現していることが分かる。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 ($\omega = ck / \sqrt{\epsilon(0)}$) 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 $\omega_{\text{TO}1}$ に近づいてゆく。

この最下位の第一バンドの漸近線の傾きから静的誘電率 $\omega(0)$ を求めることができることも確認できる。したがって、平行平板の試料の両面に金属膜を蒸着し、リード線をつけてブリッジ法で測定しなくてもこの方法ならば非接触非破壊で物質の静的誘電率 $\omega(0)$ を決定することができるが予測できる。一方、 $N=2$ の場合の第3分枝は最も高い振動数の分枝であるから、波数0で $\omega_{\text{LO}2}$ 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 ($\omega = ck / \sqrt{\epsilon(\infty)}$) に沿って増加してゆく。

実際にTHz-TDSで測定したフォノン・ポラリトン分散の研究は幾つも報告されているが⁴⁶⁻⁴⁹⁾、ここでは例として本解説のその1でも少し紹介した強誘電体 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ (BIT) の測定結果を考察する⁵¹⁾。BITの結晶構造は $(\text{Bi}_2\text{O}_2)^{2+}(\text{A}_{m-1}\text{B}_m\text{O}_{3m+1})^2$ 、と表されるように擬ペロブスカイト層を酸化ビスマスの層が挟み込むような積層構造をとっている (Fig. 2-17)⁵⁰⁾。ここで $\text{A}=\text{Bi}$ で $\text{B}=\text{Ti}$ 、である。その中でも特に重要な $m=3$ のBITは転移点 675°C 以上の高温で正方晶の空間群 $D_{4h}^{17} - I4/mmm$ (点群 $4/mmm$)の常誘電相に属し、転移点以下では単斜晶系で点群 m (空間群は $C_s^2 - P1a1$ が最も有力)に属する強誘電相となる⁵²⁾。Table Iに構造相転移の様子をまとめた。

Table I Phase transition in $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$.

$T_c = 948 \text{ K}$	
Ferroelectric monoclinic $C_s^2 - P1a1$	Paraelectric tetragonal $D_{4h}^{17} - I4/mmm$

強誘電相では $A'(x, z)$ ソフトモードがラマン散乱で見出されており、強誘電性の発現機構は変位型 (displacive type) に分類される。常温の強誘電相では赤外活性かつラマン活性の $A'(x, z)$ および $A''(y)$ モードがある。

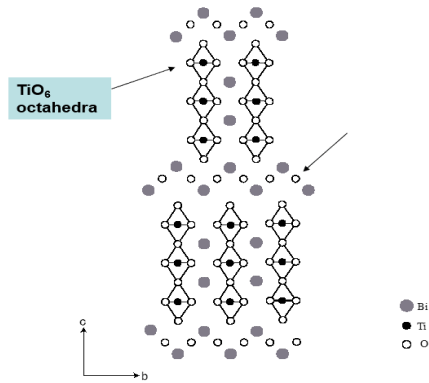
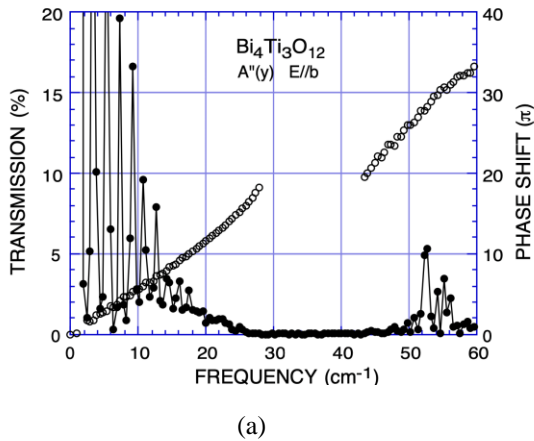
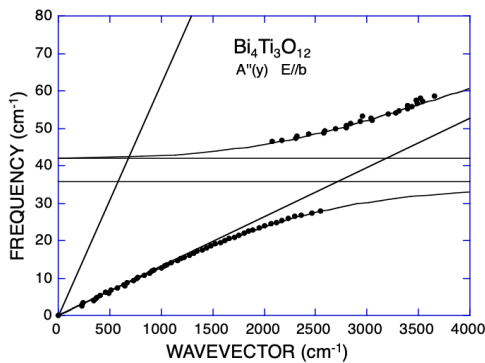


Fig. 2-17 Schematic drawing of crystal structure in paraelectric phase of $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$. Space group is $I4/mmm$.



(a)



(b)

Fig. 2-18 (a) Transmission and phase shift spectra of $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$. Black solid circles show transmission intensity and open circles show phase shifts. (b) Phono-polariton dispersion relation belonging to $A''(y)$ representation estimated by phase shift spectrum⁵¹⁾.

$A'(x, z)$ 規約表現のポラリトン分散の測定結果は本稿の「その(1)」の Figure 2-18(a)を参照にされたい。ここでは、Fig. 2-18(a)に $A''(y)$ モードに対応する測定配置における透過率及び位相シフトスペクトルを示す⁵¹⁾。振動数 $23 \text{ cm}^{-1} \sim 36 \text{ cm}^{-1}$ の TO フォノンと LO フォノンの間のギャップに対応する不透明領域が見られる。ここで、透過率に見られる櫛の歯状の鋭い周期的変調は前述の平行平板試料を透過する際の多重干渉効果によるものである。位相シフトスペクトル $\phi(\omega)$ から式 (2-7)により導いた分散関係 $\omega(k)$ を Fig. 2-18(b)に示す。実線は式(2-8)にラマン散乱測定により得られた光学フォノンの振動数を取り入れて計算した分散関係である。フォノン・ポラリトン特有のLO-TO分裂が確認できる。また、最も低い分枝の傾きから静的誘電率 $\epsilon(0) = 149.0$ が求められる。尚、この値は電氣的測定手段(ブリッジ法)により得られた値と良い一致を示す。これにより、THz-TDSにより静的誘電率を非接触・非破壊で測定できる有効な手段であることも実証された。

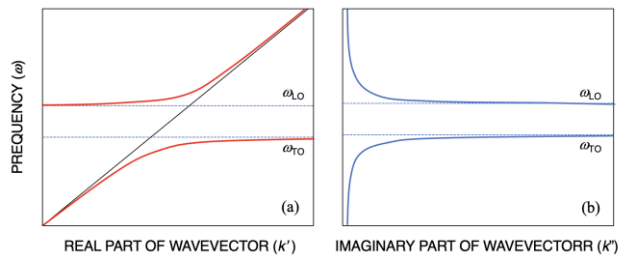


Fig. 2-19 Schematic drawing of phono-polariton dispersion relation. (a) Real part of wavevector $\omega(k')$ and (b) imaginary part of $\omega(k'')$ ⁵³⁻⁵⁵⁾.

前述のように、ここでは調和振動子の減衰が無視できるとして議論したが、実際の誘電関数 $\epsilon(\omega)$ は式 (2-11)で表されるように複素数である。波数ベクトル k を実部と虚部に分けて、

$$k = k' + k'' \quad (2-14)$$

とおき式 (2-13) によって $\omega(k')$ と $\omega(k'')$ を算出した概念図が Fig. 2-19 である⁵³⁻⁵⁵⁾。THz-TDSの測定結果からこれらのポラリトン分散関係を導くには透過強度および位相シフトスペクトル (Fig. 2-18 (a)) から複素誘電関数 $\epsilon(\omega)$ を求め、その値を式 (2-13) に代入して算出する (解析結果は文献 56 を参照されたい。)⁵⁶⁾。

5 まとめ

本稿「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」では、電磁波のテラヘルツ振動数領域での最新の分光法である THz-TDS についてその原理と実際の分光装置について紹介した。時間領域分光法では、波形を時間の関数として測定し、電場の振幅と位相スペクトルを同時に算出できる。この利点に着目した媒質中の電磁波の分散関係の導出の実例として著者らがこれまで研究対象としてきた下記の研究について紹介し、得られた成果に議論した。

- (1) 強誘電体の極性フォノンモードの誘電関数の実部と虚部（誘電率および誘電損失）の同時決定
- (2) ボゾンピークの測定とその起因についての推測
- (3) 矩形導波管中の電磁波の分散関係の導出とカットオフ周波数の検証。
- (4) 立方晶フォトニック結晶中のフォトニックバンド構造の導出とバンドギャップ振動数の決定。
- (5) 欠陥を導入した 2D 三角形格子フォトニック結晶中に出現する光局在モードの伝播特性の解析。
- (6) 強誘電体単結晶中に励起されるフォノン・ポラリトン分散関係の決定。

電磁波において THz 領域は、より波長の長い電波とより波長の短い光波の狭間に存在している。このため、この周波数領域での電磁波の発信素子や検出素子の開発は遅れ、これまで「未踏の電磁波」とさえ呼ばれていた。近年、パルス幅が数十フェムト秒にまで達する超単パルスレーザが開発され THz 領域の電磁波の発生が比較的容易になった。加えて光伝導アンテナの開発によりそれを発信と受信の両方の素子として利用した時間領域分光法も研究され、THz-TDS が市販されるまでになった。著者（武田）も設立に参画したベンチャー企業（株）先端赤外（Ispc）など世界中で数十社が測定領域の拡充や測定感度の向上等より性能の良い分光装置の開発を競い合っている。THz-TDS はこの領域の機能材料の探索や新規の電磁波応用の基盤装置としてますます重要度を増してきている。また、純粋な学術分野の研究者としては光物性分野におけるこの領域特有の素励起の研究に役立つより高性能の分光装置の開発研究に強く期待している。

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）先端赤外社長の西澤誠治博士、筑波大学の小島誠治名誉教授、名古屋工業大学の岩田真教授、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る。また、信州大学理学部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・ティイー・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”, *長野県南信工短期大学紀要*, **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, シリカガラスのボソン・ピークとその物性物理学会誌 BUTURI, **58** [7], pp512-519 (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. Sakod, “*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, “二次元フォトニック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ニック結晶への応用”, *固体物理*, **36**, 391-401, 2001年.
 - 37) 武田三男, “テラヘルツ波制御用 3次元フォトニック結晶の創製と応用”, *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. W. 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 「フォトニック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).
- 52) D. Urushihara, M. Komabuchi, N. Ishizawa, T. Asaka, K. Fukuda, and M. Iwata: Crystal structure Evaluation of the Ferroelectric Layered Perovskite $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$; *J. Jpn. Soc. Powder Metallurgy*, **65**, 687 (Japanese).
- 53) T. Luo, B. Ilyas, A. von Hoegen, Y. Lee, J. Park, J.-G. Park and N. Gedik: Time-of-flight detection of terahertz phonon-polariton; *Nature Communications*, **15**, 2276 (2024).
- 54) Igawa, T. Mori, and S. Kojima: Terahertz time-domain spectroscopy of congruent LiNbO_3 and LiTaO_3 crystals; *Jpn. J. Appl. Phys.*, **53**, 05FE01-1-4, (2014)
- 55) S. Kojima and T. Mori: "Broadband terahertz time-domain spectroscopy of ferroelectric LiTaO_3 : Phonon polariton dispersion; *AIP Conference Proceedings*, **1627**, 52-57 (2014).
- 56) S. Kojima, N. Tsumura, H. Kitahara, and M. W. Takeda: Time of Flight Detection of Anisotropic Phonon-Polariton Dispersions in Ferroelectric Bismuth Titanate; *Proceeding of PIERS2024, Ciba*, 5-9 November, (2025).
- 57) 武田三男, 北原英明, “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”, 長野県南信工科短期大学校紀要, **8**, 12-26 (2024) .

【解説】

誘電体結晶における不整合-整合構造相転移の分光学的研究

武田三男*

Spectroscopic Studies of Incommensurate-Commensurate Structural Phase Transitions in Dielectrics Crystals

Mitsuo W. TAKEDA

あらまし 亜硝酸ナトリウム (NaNO_2) のように、ユニットセルのサイズ (単位) が構造転移前後で元の整数倍でない変調相と呼ばれる中間層が現れる強誘電体が幾つか知られていた。1976年に M. Iizumi らが中性子非弾性散乱実験によりセレン酸カリ (K_2SeO_4) の $q/q_{\text{max}} = 0.3$ 付近にブロードな極小を持つ S_2 分枝が、温度が最初の転移点に近づくに従ってしだいに下がってゆき、転移点直上では極小付近の振動数はほぼ0となる典型的なソフト化を見出した。さらに温度を下げてゆくと次の転移点で q_S が厳密に $1/3$ となることを確認した。この発見をきっかけに、セレン酸カリの仲間である硫酸アンモニウムグループの Rb_2ZnCl_4 , $[\text{N}(\text{CH}_3)_4]_2\text{CuBr}_4$ などや $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$, $\text{Sr}_2\text{Ta}_2\text{O}_7$, $\text{Sr}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ 等の酸化物強誘電体、さらには $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$, $\text{C}_6\text{H}_5\text{-C}_6\text{H}_5$ などの高分子化合物の結晶で「不整合-整合構造相転移」を起こす物質が再認識され、それらの相転移機構の理論的・実験的研究が進んだ。ここでは、 K_2SeO_4 の相転移で現れる「振幅モード」と「位相モード」を中心に実験結果に基づき不整合-整合構造相転移について考察する。

Summary It is known that some ferroelectrics which undergo successively structural-phase-transition where the size of unit cell in intermediate phase between para and ferroelectric ones is not just integer multiple but near integer multiple of that in paraelectric one. In the ferroelectric phase the unit cell size becomes just integer multiple of that in paraelectric phase as is in NaNO_2 . M. Iizumi et al. reported that a lowest phonon branch of K_2SeO_4 becomes soften around phase transition point and frozen at not exactly but close to $1/3 c^*$ by neutron inelastic scattering in 1996. This report became a trigger of the following studies of incommensurate phase transitions. Phase transitions in ferroelectrics such as Rb_2ZnCl_4 and $[\text{N}(\text{CH}_3)_4]_2\text{CuBr}_4$ which belonging to ammonium sulfate, and oxide ferroelectrics such as $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$, $\text{Sr}_2\text{Ta}_2\text{O}_7$, and $\text{Sr}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$, and polymer compounds such as Thiourea and Biphenyl are re-recognized. In the present review amplitude mode and phase mode that appear in the incommensurate phase transition of K_2SeO_4 are discussed based on the experimental results.

Key Words: Ferroelectrics, Incommensurate, Commensurate, Successive transitions, Structural phase transition, Soft mode, Amplitude mode, Phase mode, Displacive type, Dielectric functions, Neutron scattering, Raman scattering, Transfer of transition dynamics, K_2SeO_4 , NaNO_2 , Biphenyl, Thiourea.

受理 2025年 8月 31日
採択 2025年 9月 30日

- *1 長野県南信工科短期大学校, 南箕輪村
Nagano Prefecture Nanshin Institute of Technology,
8304-190 Minamiminowa, Nagano, 399-4511 Japan
*2 信州大学, 理学部, 松本市
Faculty of Science, Shinshu University,
3-1-1 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, Guangzhon, China

1. まえがき

結晶の相転移では、ユニットセルのサイズ (基本化学式) がその転移の前後で整数比を持たない (incommensurate), 言い換えるとソフト化するフォノンの波数ベクトルが逆格子ベクトルと整数比を持たない不整合相 (incommensurate phase) が出現する場合がある¹⁻⁵⁾。強磁性体ではスピンの螺旋構造や液晶における変調構造などが以前から知られていた⁶⁻⁸⁾。また、電荷密度波が主役である低次元伝導体では電子・

格子相互作用により格子変形が電子のフェルミ面に支配されて「パイエルズ転移」と呼ばれる不整合転移を起こすことが知られている⁹⁾。

誘電体の構造相転移においては、亜硝酸ナトリウム (NaNO_2) のように、ユニットセルのサイズ (単位) が構造転移前後で元の整数倍でない変調相と呼ばれる中間層が現れることが、1960年代に J. Sakurai らによって報告されていた¹⁰⁻¹²⁾。その後、 $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ など幾つかの強誘電体で発見され、誘電体の構造相転移でも例外的なケースではなくなりつつあった¹³⁻³⁰⁾。そのような中で変調相の研究が一段と進んだのは、1977年に日本原子力研究所の M. Iizumi らがブルックヘブン研究所の J. D. Axe や G. Shirane らと中性子非弾性散乱実験により、セレン酸カリ (K_2SeO_4) の中間相のユニットセルが原型相である常誘電相のその3倍に近いが厳密には3倍でない不整合相であること、さらに低温側で厳密に3倍の強誘電相へとロックイン転移を起こす原因となる $q/q_{\text{max}} = 0.3$ 付近にブロードな極小を持つ S_2 分枝のソフト化を見出したことによる⁴⁴⁾。すなわち、波数ベクトルが逆格子ベクトルと整数比を持たない位置で極小となっているフォノン分枝の一つがソフト化していることを見出した。この研究を機に、不整合構造を持つ誘電体が次々と見つかり、不整合逐次相転移の研究が盛んになりつつあった。

ちょうどその時期に著者が在職していた名古屋大学工学部附属人工結晶研究施設の高木豊研究室では、群論を駆使した構造相転移の現象論をチェコスロバキア科学アカデミーのドボルザークらと議論していたことから、不整合相ではソフトフォノンモードがラマン活性となることを予測した。

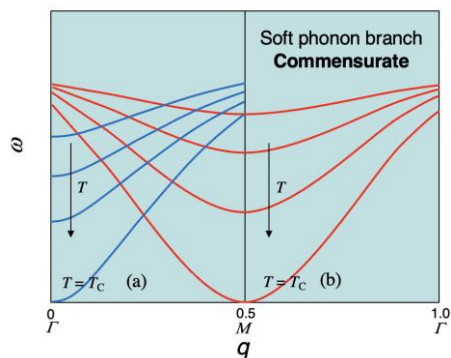


Fig. 1. Schematic drawing of soft phonon branch as temperature approaching to T_c . (a) at zone center and (b) at zone boundary.

さらに、ロックイン転移した3倍のユニットセルを持つ強誘電相ではソフトフォノンの縮退が解け二つのソフトモード、「振幅モード (amplitude mode)」と「位相モード (phase mode)」が出現することを予測した。著者らは、実際に低温下のラマン散乱実験を行い、これら2つの不整合・整合構造相転移に特有なソフトモードを確認した^{46,47)}。

本解説では著者らが見出した K_2SeO_4 の振幅モードと位相モードの実験結果を中心に、 Rb_2ZnCl_4 、さらには $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ 、 $\text{C}_6\text{H}_5\text{-C}_6\text{H}_5$ などの分子化合物の実験結果を紹介し、不整合相-強誘電相転移について考察する。現象論に基づいた理論的な研究については参考文献に挙げた Y. Ishibashi らの論文を熟読されたい³⁹⁻⁴³⁾。

2. 不整合・整合構造相転移

強誘電体には、温度を下げてゆくと常誘電相からいくつか異なる対称性に属する強誘電相へと次々に転移してゆく逐次構造相転移 (successive phase transition) を起こすものがある。低温側の相のユニットセルのサイズは元の常誘電相 (原型相と呼ぶ) のそれと変わらないか、その整数倍となることがほとんどである。これは逆格子空間で見ればブリリアンゾーンの境界などの対照性の高い点のフォノンがソフト化し転移点で凍結していることに他ならない。一方、ユニットセルの大きさが変化しない相転移ではゾーン中心 (Γ 点) のフォノンが凍結する。

Figure 1 にフォノン分枝がソフト化してゆく様子を模式的に示した。左半分の図に Γ 点に極小を持つ最低振動数のフォノン分枝 (青色の曲線) が、温度が転移点に近づくにつれ低く下がってゆく様子を示した。

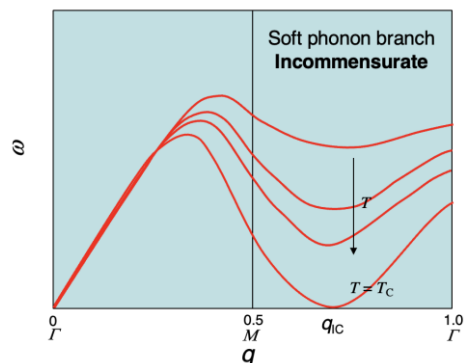


Fig. 2. Schematic drawing of soft phonon branch around $1/(3a^*)$ as temperature approaching to T_c .

ソフトフォノンの振動数 ω は転移点から離れた温度では高い位置にあるが、温度が転移点に近づくにつれ低くなってゆき、ついには転移点で0となる。このモードが凍結して新しい相が出現する。ユニットセルが2倍になる場合を Fig. 1 の赤色の曲線で示す。ゾーン境界 (M 点) に極小を持つ最低振動数のフォノン分枝が温度が転移点に近づくにつれて低く下がってゆき、ついには転移点で0となる。このモードが凍結した結果、ユニットセルが2倍の新しい相が出現する。

ところが結晶によっては、ゾーン中心や境界などの特別な点ではない任意の点のフォノンが凍結する場合も当然考えられる。Figure 2 に、フォノンモードのゾーンのおおよそ 1/3 の点の周りに極小がある場合を模式的に示す。転移点ではこの厳密には 1/3 でないモードが凍結すると、新しく出現する相のユニットセルは原型相の厳密には3倍とはならないがそれに近い不整合相となる。不整合相を伴う多くの結晶は、さらに温度を下げゆくと不整合相から整合相へと転移する逐次構造相転移を起こすことがある。この低温相は自発分極の反転する強誘電相となる場合がある。この不整合相から整合相への転移は「ロックイン転移」と呼ばれている。

整合相 (強誘電相) ⇔ 不整合相 ⇔ 原型相

微視的に解釈すると、ユニットセルが変化しない場合は最隣接ユニットセルの原子 (分極) 同士の相互作用が大きな役割を演じていることになる。2倍になる場合はゾーン境界のフォノンモードが凍結する。このときは、第2隣接ユニットセルまで長距離相互作用が及んでいると考えられる。不整合相転移が起きる場合の相互作用は高次項の大きさの微妙なバランスによるものと考えられる。

3. セレン酸カリ型結晶

3.1 セレン酸カリ

最初に、セレン酸カリ (K_2SeO_4) の不整合・整合相転移の様子を紹介する。 K_2SeO_4 の強誘電性相転移は1969年に初めて K. Aiki らによって見出された³⁴⁾。 K_2SeO_4 の逐次相転移の様子を Table 1 にまとめた。転移は3回確認されており、転移温度は高温側から $T_1 = 745.0$ K, $T_2 = 129.5$ K そして $T_3 = 93$ K である。結晶構造は、高温側の I 相は六方晶系の D_{6h}^4 - $P6_3/mmc$ に、II 相は斜方晶系の D_{2h}^{16} - $Pnam$ 属す。この II 相を不整合・整

合相転移の概念から原型相と呼ぶ。そして、III 相が問題の不整合相である。ここでは、 a 軸方向にユニットセルが原型相の約3倍となる。そして、 T_3 以下の IV 相が結晶軸の a 軸方向にユニットセルが原型相の厳密に3倍となる整合相である。IV 相の斜方晶系の C_{2v}^9 - $Pna2_1$ 属し、 c 軸方向に自発分極が現れ強誘電相となる。

Table 1 Successive phase transitions in K_2SeO_4

	T_3 91.3 K	T_2 129.5 K	T_1 745.0 K
IV	III	II	I
Commensurate Ferroelectric $P_3 // c$ Orthorhombic $C_{2v}^9 - Pna2_1$ $3a$	Incommensurate Paraelectric Orthorhombic $\sim 3a$	Proto type Paraelectric Orthorhombic $D_{2h}^{16} - Pnam$ a	Paraelectric Hexagonal $D_{6h}^4 - P6_3/mmc$ a_0

K_2SeO_4 の結晶構造は硫酸アンモニウムの仲間である硫酸カリのモルフォロジーの一つである K_2SO_4 -b 型に分類される。Figure 3 に常誘電相かつ原型相である II 相の結晶構造の概念図を示す¹⁷⁾。三角形が SeO_4 の四面体であり、点線と実線で描かれた2種類の丸印が K 原子を示す。I 相はこの図中の b 軸方向にずれた2種類の K 原子が重なった位置にある六方晶系 D_{6h}^4 - $P6_3/mmc$ に属す。I 相は今回の不整合相転移の議論から外れるので、ここでは、II 相以下の相転移について議論する。

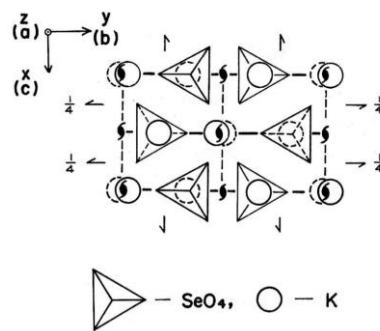


Fig. 3. Schematic drawing of crystal structure of K_2SeO_4 in the paraelectric phase II (D_{2h}^{16} - $Pnam$)⁴⁶⁾.

1977年に M. Iizumi らは中性子非弾性散乱実験により、Fig. 4 に示すように温度が転移点 $T_2 = 129.5$ K に近づくに従って、250 K では $q/q_{max} = 0.3$ 付近にブロードな極小を持つ S_2 分枝がしだいに下がってゆき、転移点直上の 130 K では極小付近の振動数はほぼ0となる典型的なソフト化を見出した^{17, 38)}。凍結する分枝の逆格子ベクトル q_S は 1/3 に近いが厳密には 1/3 ではないことを確認した。さらに温度を下げゆくと $T_3 = 93$ K で q_S が厳密に 1/3 となることも確認した。すなわち、III

相は不整合相であり、原型相の約3倍となる原因は原型相の S_2 分枝の $q/q_{\max} \cong 0.31$ フォノンのソフト化にあることが明らかになった。

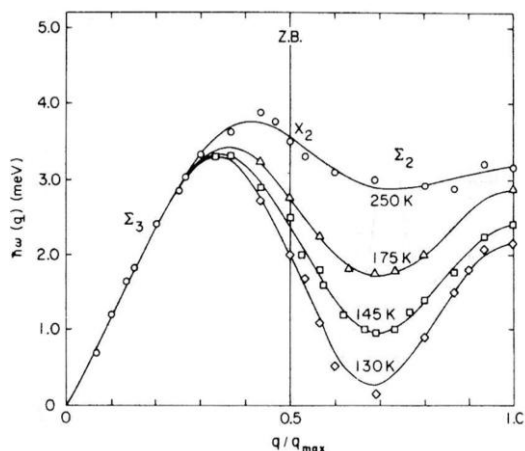


Fig. 4. Schematic drawing of soft phonon branch around $1/(3a^*)$ of K_2SeO_4 as temperature is approaching to T_c ⁴⁴⁾.

著者らもこの逐次構造相転移に着目し、原型相である II 相 (D_{2h}^{16} -Pnam)の格子振動について群論に基づき各規約表現に属する数を算出した。Table 2 に II 相における因子群解析の結果を示す⁴⁶⁾。

ラマン散乱等の光散乱や赤外分光では結晶の格子定数に比較して桁違いに波長の長い電磁波を用いるため長波長近似（隣接するユニットセルの格子振動も同じ位相で振動する）の Γ 点の近くの格子振動を測定することができる。従って、格子振動の群論解析には長波長近似（隣ユニットセルの格子振動も同じ位相で振動する）となるため、ブリリアン帯の空間群 (D_{2h}^{16}) ではなく点群 (D_{2h}) を用いることが適切である。

Table 2 Factor group analysis of K_2SeO_4 in the phase II (D_{2h}^{16} - Pnam), SO_4^{2-} ions are treated as well-bonded molecules. N, T, T', R', and n are numbers of normal modes, the acoustic modes, translational optical modes, librational optical modes and internal modes, respectively.

D_{2h}	N	T	T'	R'	n	IR	Raman
A_g	13	0	6	1	6		$x^2(c^2), y^2(b^2), z^2(a^2)$
A_u	8	0	3	2	3		
B_{1g}	8	0	3	2	3		$xy(bc)$
B_{1u}	13	1	5	1	6	$z(a)$	
B_{2g}	8	0	3	2	3		$xz(ac)$
B_{2u}	13	1	5	1	6	$y(b)$	
B_{3g}	13	0	6	1	6		$yz(ab)$
B_{3u}	8	1	2	2	3	$x(c)$	
	84	3	33	12	36		

Iizumi らが中性子散乱で見出した S_2 分枝のソフトフォノンモードが凍結した不整合相である III 相では凍結した逆格子ベクトルの位置が新たなブリリアンゾーンを中心である Γ 点となる。この相の結晶構造の空間群は不整合な長周期構造をとっているため、II 相の D_{2h}^{16} -Pnam か IV 相の C_{2v}^9 -Pna2₁ のどちらとも見なすことはできない。一方で、ラマン散乱では長波長近似が使えるため点群で議論することが可能と考えられる。IV 相と同じ C_{2v} ならば反転対象がないため自発分極が観測されるはずであるがその報告はない。しかしながら、 a 軸方向の変調で反転対象がなくなっていれば、IV 相と同じ C_{2v} とみなせる。このことに着目して、まず、室温から液体窒素温度までの低温下のラマン散乱実験を行った¹⁸⁾。

Figure 5 に測定方位 $a(aa)b$ におけるラマン散乱スペクトルの温度依存性を示す。強誘電相の 77 K で 30 cm^{-1} の散乱ピークが温度上昇に伴って 0 cm^{-1} のレーリー線に近づいてゆき、 $T_3 = 93\text{ K}$ を越えて $T = 106\text{ K}$ の不整合相に入ってもピークはそのまま確認でき、さらにソフト化していくことが確認できる。すなわち、このモードが Iizumi らが原型相において中性子散乱で見出した S_2 分枝のソフトフォノンモードが $T_2 = 129.5\text{ K}$ で凍結し、新しい不整合相での平衡点を振動の新たな原点

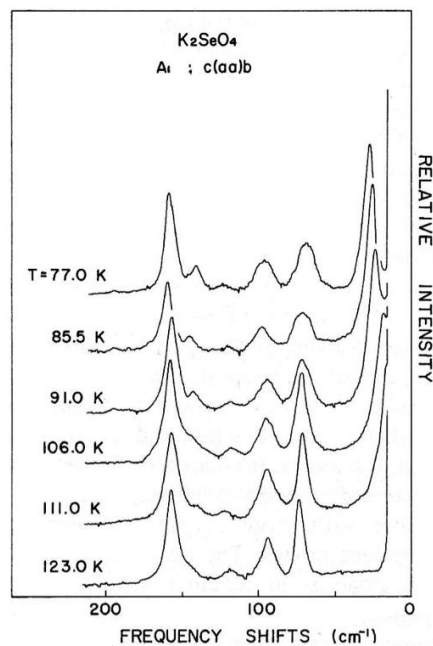


Fig. 5. Raman scattering spectra of K_2SeO_4 in region $0\sim 200\text{ cm}^{-1}$ for $a(aa)b$ orientation at different temperature⁴⁶⁾.

として再び解凍してゆくソフトモード (ω_{A1}) であると考えられる。

このラマン散乱実験では液体窒素温度 (77 K) 以下の測定ができなかったが、 $T_3 = 93$ K 以下の強誘電相でのソフトフォノンモードの特徴について、群論による因子群解析を行なった。Table 3 と Table 4 に、それぞれIII相の空間群 $Pnam$ の $\Sigma(k,0,0)$ 分枝における規約表現とIV相の $Pna2_1$ の Γ 点の規約表現の指表を示す¹⁹⁾。これから、2重縮退していた Σ_2 分枝は強誘電相である整合相で A_1 モードと B_2 モードに分裂することがわかる。

$$\Sigma_2 \rightarrow A_1(aa) + B_2(ca)$$

上述の不整合相から整合相へと連続的にソフト化してゆくフォノンがこの A_1 モードである。一方、 B_2 規約表現の基底は ac (もしくは ca) であることから、強誘電相で B_2 規約表現のソフトモードが観測されることが予想される。そこで、液体ヘリウム温度までのラマン散乱実験を電子総合研究所の植博士と作道博士の研究室で実施した。その結果を Fig. 6 に示す。予測通り、15 K で 13 cm^{-1} のピーク (ω_{B2}) が温度が転移点 $T_3 = 93$ K に近づくに従ってソフト化してゆくことを確認できた。

フォノンに起因する格子振動成分はスペクトルから、レーリー成分を補正し、以下の式(1)に示すローレンツ型の減衰調和振動子に近似して、振動数 ω_s と減衰定数 γ_s を算出する。

$$I(\omega) = I_0 \omega_s \gamma_s \frac{1}{(\omega_s^2 - \omega^2)^2 + \gamma_s^2 \omega^2} \quad (1)$$

Table 3 Small irreducible representations at the $\Sigma(k, 0, 0)$ branch of the space group $Pnam$. $\mu = e^{ika/2}$.

$Pnam$	$\{E 000\}$	$\{C_{2a} a/2 b/2 0\}$	$\{\sigma_b a/2 b/2 0\}$	$\{\sigma_c 0 0 0\}$
Σ_1	1	μ	μ	1
Σ_2	1	μ	$-\mu$	-1
Σ_3	1	$-\mu$	μ	-1
Σ_4	1	$-\mu$	$-\mu$	1

Table 4 Character table of the irreducible representation at the Γ point of the space group $Pna2_1$.

$Pna2_1$	E	C_{2c}	σ_a	σ_b	IR	Raman
A_1	1	1	1	1	c	a^2, b^2, c^2
A_2	1	1	-1	-1		ab
B_1	1	-1	1	-1	b	bc
B_2	1	-1	-1	1	a	ca

Figure 7 に式(1)により算出した2つのソフトモード (ω_{A1} と ω_{B2}) の温度依存性を示す。 ω_{A1} モードと ω_{B2} モードが後述の Dvorark が命名した「振幅モード (amplitude mode)」と「位相モード (phase mode)」であり、今回のラマン散乱により初めて確認されたものである^{46,47)}。

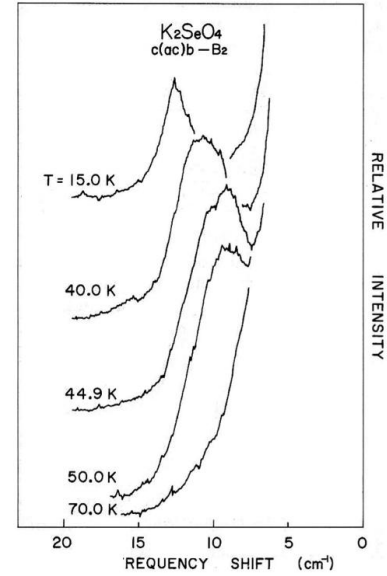


Fig. 6. Raman scattering spectra of K_2SeO_4 in region $0 \sim 20 \text{ cm}^{-1}$ for $c(ac)b$ orientation at different temperature⁴⁷⁾.

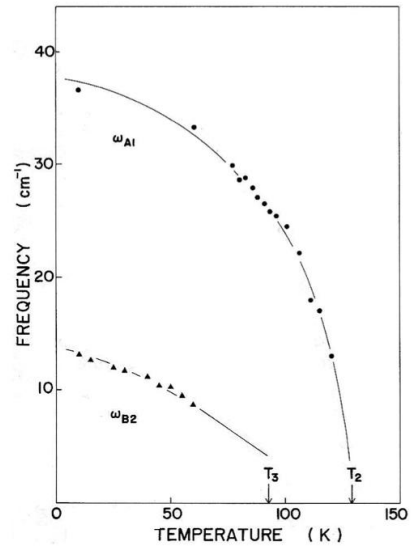


Fig. 7. Frequency of the soft A_1 mode ω_{A1} and the soft B_2 mode ω_{B2} of K_2SeO_4 versus temperature. Soft A_1 mode is “amplitude mode” and soft B_2 mode is “phase mode”⁴⁷⁾.

振幅モードの振動数 ω_{A1} は、原型相の S_2 ソフトフォノンと同様に振動数の2乗の逆数($1/\omega_{A1}^2$)となり、いわゆるCurie - Weiss則にしたがって温度変化する。整合・不整合相転移点 T_3 ではほぼ連続的に変化しているように見える。

$$\omega_{A1} \propto (T - T_2)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

一方、位相モードの振動数 ω_{B2} は温度に比例して変化する。不整合・整合相転移点 T_3 以上では不連続に消滅する。

$$\omega_{B2} \propto (T - T_C) \quad (3)$$

振幅モードの振動数 ω_{A1} の T_3 における連続性と位相モードの振動数 ω_{B2} の温度変化の線形性については、著者らの論文 (ref(19)) で群論と現象論を用いて詳しく議論されているので参考にされたい。

著者らがラマン散乱実験での位相モードの発見に触発されて、Iizumiらが中性子散乱で再測定した3つのソフトフォノンモード振動数 (Σ_2 , ω_{A1} , ω_{B2}) の温度依存性をFig. 8に示す⁴⁸⁾。ラマン散乱で著者らが見出した振幅モードと位相モードの温度依存性 (式(1)および式(2)) を確認した。

以上の実験結果から推測した原型相→不整合相→整合相に渡ってのブリルアンゾーン中のソフトフォノン分枝の温度変化の概念図をFig. 9に示す。原型相では温度降下に伴い、ゾーン中心や境界などの特別な点ではない任意の点に極小を持つフォノン分枝が段々と下降して行く (Fig. 9(a))。不整合相に入るとFig. 9(b)に

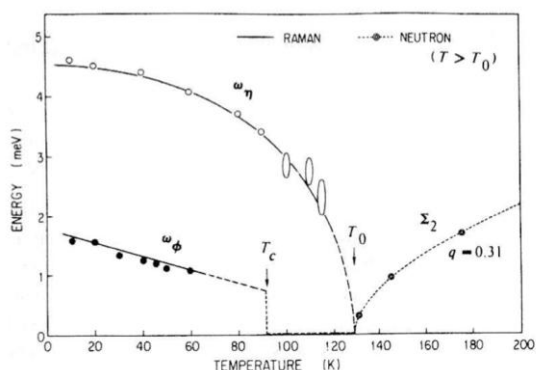


Fig. 8. Temperature dependence of $q = 0$ phase and amplitude mode frequencies of K_2SeO_4 . Solid lines indicate Raman scattering results, data points are neutron results⁴⁸⁾.

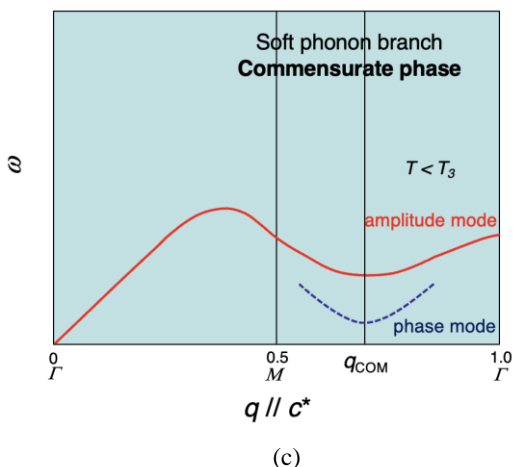
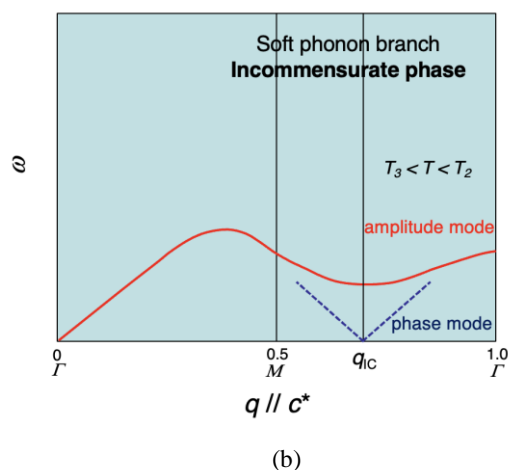
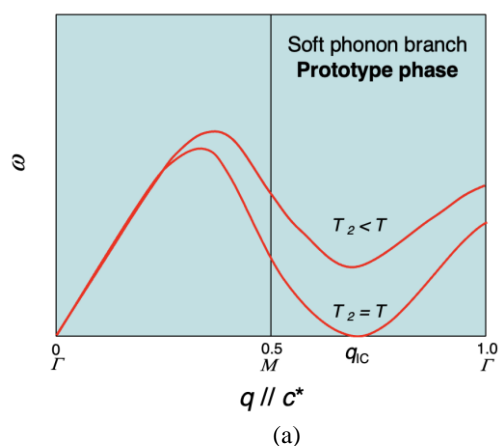


Fig. 9. Schematic drawing of soft phonon branch that has minimum around $1/(3c^*)$ as temperature decreases. (a) in prototype phase, (b) in incommensurate phase, and (c) in commensurate phase.

示すように分枝の縮退が解け、振幅モードと位相モードが出現する。この不整合相では振幅モードの振動数は有限の値を持ちラマン散乱等の測定にかかるが、位相モードは新たにゾーン中心となった q_{1c} を原点とした q に比例する分散関係となる。音響モードのようにバンドギャップを持たないゴールドストーンモード (Goldstone mode) となって出現する。 T_3 以下の整合相にロックイン転移したのちの分枝の様子をFig. 9(c)に示す。正確に整数分の1の q_{COM} が新たにゾーン中心となり、位相モード振動数は有限の値を取り、ラマン散乱でも観測されるようになる。

縮退が解けた後に出現する振幅モードと位相モードの空間分布の概念図をそれぞれ Fig.10(a)と 10(b)に示す。緑のラインがそれぞれのモードの原子変位を表している。ユニットセルを構成する原子 (分子) の変位のパターン (青色で示した変異) はどちらも全く同じであるが元の原型相の平衡位置からの相対的な関係 (位相) がちょうど $1/4$ 周期 ($\pi/2$) ずれている。振幅モードは元の振動モードの振幅が増強された様に捉えることができ、一方、位相モードは位相がずれたとみなせる。これが、振幅モードと位相モードの命名の由来である。誘電体の不整合・整合相転移は、これまで原子・分子間のクーロン力の長距離相互作用が偶然生み出した特殊な変調構造を含む逐次構造相転移と見做されていた。しかし、Iizumi らの中性子散乱による K_2SeO_4 の研究成果はその後の多くの実験的・理論的研究によって補強され、強磁性体のスピンの螺旋構造や液晶における変

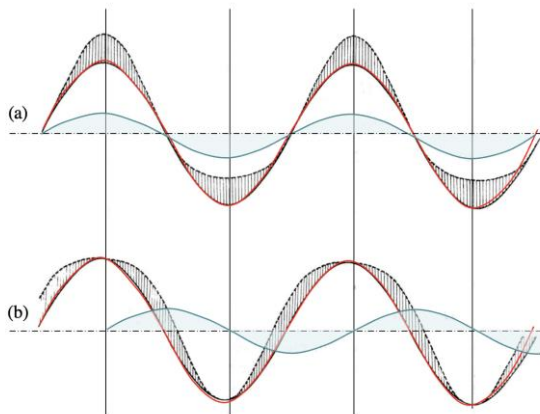


Fig. 10 Schematic illustration of the amplitude mode and phase mode. (a) Amplitude mode and (b) phase mode. Broken lines represent excitations⁴⁴⁾.

調構造、電荷密度波が主役である低次元伝導体での不整合構造と同様に固体物理学の中の一つの研究分野として認知されるきっかけとなった極めて有意義な研究である。

3. 2 塩化亜鉛ルビジウム (Rb_2ZnCl_4)

次に、 K_2SeO_4 と同じ K_2SO_4 -b 型に分類される結晶構造を持つ塩化亜鉛ルビジウム (Rb_2ZnCl_4) の結果を紹介する。 Rb_2ZnCl_4 の逐次相転移を Table 5 に示す⁴⁵⁻⁴⁷⁾。I相が原型相で K_2SeO_4 との原型層と同じ D_{2h}^{16} -Pnam ($Z=4$)であり、II相が不整合相、III相とIV相が整合相でそれぞれ c 軸方向に3倍と6倍の格子定数を持つ。 K_2SeO_4 との大きな違いは、①高温側に六方晶系の相が存在しないことと、②最低温領域にもう一つ新しい強誘電相が出現することの2点である。

Table 5 Successive phases transitions in Rb_2ZnCl_4

	T_3 74.6 K	T_2 189.0 K	T_1 302.0 K
IV	III	II	I
Commensurate Ferroelectric $Ps // a$ Orthorhombic $C_2^2 - P2_111$ 6c	Commensurate Ferroelectric $Ps // a$ Orthorhombic $C_{2v}^9 - P2_1cn$ 3c	Incommensurate Paraelectric ~3c	Proto type Paraelectric Orthorhombic $D_{2h}^{16} - Pmnc$ c

I~III相のラマンスペクトルの温度依存性を Fig. 11 に示す⁵¹⁾。77 K で 25.0cm^{-1} のモードが昇温と共にソフト化して行き 200 K あたりで 18.0cm^{-1} とアンチクロスシングを起こして、209 K ではレーリー散乱の裾野に隠れてゆくのの確認できる。これが、 T_1 の原型-不整合相転移に関与する振幅モード (ω_{amp}) である。

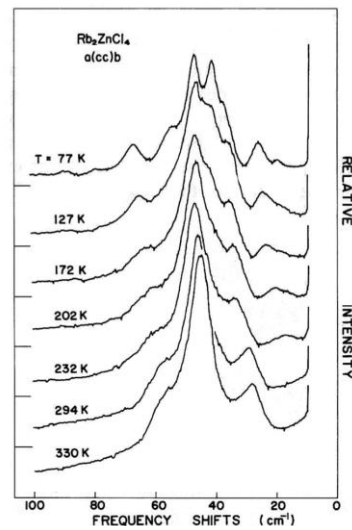
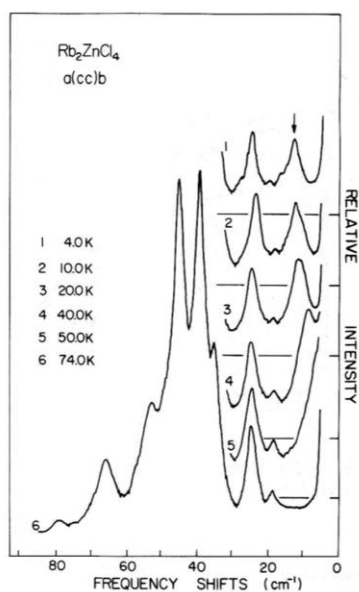


Fig. 11 Raman spectra of Rb_2ZnCl_4 for the $a(cc)b$ orientation at various temperatures⁵¹⁾.

次に、Fig. 12 に液体窒素以下の低温領域のIV相のラマンスペクトルの温度依存性を示す⁵¹⁾。この相は空間群 $C_2^2-P2_111$ に属すると考えられる。全対称表現の $a(cc)b$ スペクトルでは 4.0 K で 13.5 cm^{-1} のピークが顕著なソフト化を示す (Fig. 12(a))。また、 $a(ca)b$ スペクトルでは 7.0 K において 8 cm^{-1} と 10 cm^{-1} のピークがソフト化して行くのが確認できる (Fig. 12(b))。この最低振動数の 8 cm^{-1} のモードが T_2 の不整合-整合相転移に関与する位相モード (ω_{ph}) である。全対称表現の $a(cc)b$ スペクトルの低振動数領域の高分解能測定の結果を Fig. 13 示す。



(a)

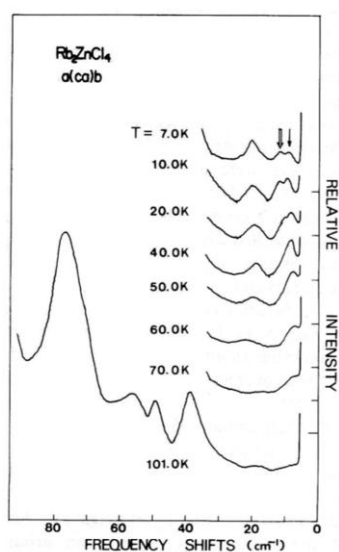


Fig. 12 Raman spectra of Rb_2ZnCl_4 for (a) $a(cc)b$ and (b) $a(ca)b$ orientation at various temperatures⁵¹⁾.

4.0 K で 10.5 cm^{-1} および 11.5 cm^{-1} のピークが顕著なソフト化を示す。これらのソフトフォノン (ω_A, ω_B) は T_3 の整合-整合相転移に関与するソフトモードと考えられる¹⁰⁻¹³⁾。逐次構造相転移に関与する、合計 6 個のソフトフォノンの振動数の温度依存性を Fig. 14 にまとめて示す¹⁰⁻¹³⁾。 K_2SeO_4 と同じように Rb_2ZnCl_4 においても、振幅モードが整合相と不整合相で見出され、位相モードが整合相で確認された。

また、 $T_3 = 74.6 \text{ K}$ の相転移に関与するソフトモードが T_3 以下の IV 相で見出された。また、 K_2SeO_4 とでは出現しないより低温の強誘電相に関与するソフトフォノンも確認し、この相転移も変位型であることを明らかにした。

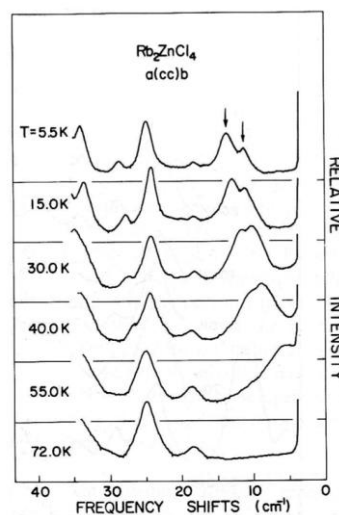


Fig. 13 Detailed Raman spectra of Rb_2ZnCl_4 in the frequency region to 40 cm^{-1} for the $a(cc)b$ orientation at various temperatures⁵¹⁾.

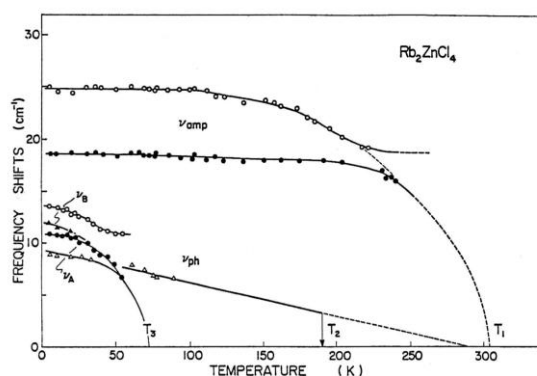


Fig. 14 Frequencies of soft phonon modes of Rb_2ZnCl_4 as functions of temperature. The open and solid triangles represent the phase mode and the soft mode that is frozen at T_3 . The open circles represent soft mode frequencies of amplitude mode⁵²⁾.

4. 分子化合物結晶

4. 1 チオ尿素

分子性結晶であるチオ尿素 ($\text{SC}(\text{NH}_2)_2$) では、1956年に Solomon より強誘電性が発見され、その後、1971年に Shiozaki らにより変調構造 (不整合相) を持つ中間相が発見された。Figure 15 にチオ尿素の室温における結晶構造の概念図を示す¹³⁻¹⁶。チオ尿素の結晶は、原型相である常誘電相では Fig. 15(a) のように S-C 方向に永久双極子能率を持つ分子によって構成されている。結晶構造を、把握しやすくするために Fig. 15(b) のように水素原子を省略して描いてみたものが Fig. 15(c) であり、チオ尿素分子が反強誘電的に配列していることが明確にみとれる。ここで、波線で描いた分子 1 及び 2 は c 軸に垂直な $z = 1/4$ 面に、実線で描いた分子 3 および 4 は $z = 3/4$ 面に位置する。

また、 $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ の逐次相転移を Table 6 に示す。塩崎らによると 202 K から 169 K までの間で 4 回 ($T_4 = 202$ K, $T_3 = 180$ K, $T_2 = 176$ K, $T_1 = 169$ K) の逐次相転移を起こす。 T_4 より高温の原型相の V 相の結晶構造は斜方晶系の $D_{2h}^{16}\text{-Pbnm}$ ($Z = 4$) に属す。IV, III, II 相の 3 つの中間相は c 軸方向に不整合構造をとる。この 3 つの不整合相では Fig. 15(c) に示したチオ尿素分子の a 軸となす角度 ϕ の c 軸方向の周期が原型相である V 相のそれらの約 8 倍から約 10 倍までの正弦波状の周期変位を持つ。

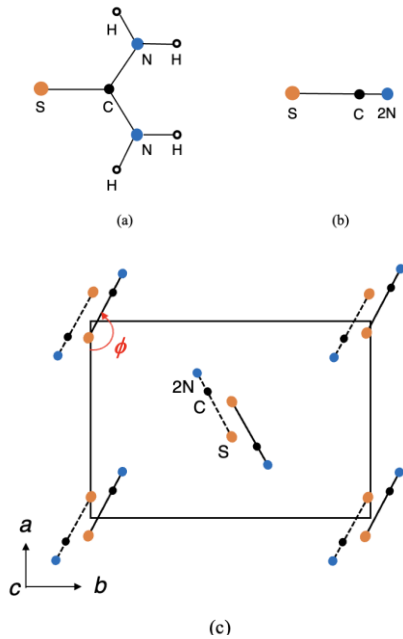


Fig. 15. Schematic drawing of crystal structure of $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ at room temperature. (a) Structure of molecule, (b) image viewed toward to the c axis, and (c) unit cell.

このうち III 相のみが b 軸方向に強誘電性を示す。原型相では、永久双極子モーメントを持つ $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ 分子が単位胞内に 4 つ存在し、 b -glide ($b/2$ の並進) と n -glide (対角線並進) によって電氣的極性が相殺されている。これに対し、I 相は整合相でありユニットセルの大きさは原型相のそれに戻る。この I 相では n -glide が消滅し、副格子 (sublattice) を形成する 2 対の分子が c 軸を回転軸としてお互いに逆回転するため、再び b 軸方向に強誘電性を示す。

Table 6 Successive phases transitions in $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$

	T_4 74.6 K	T_3 189.0 K	T_2 176.0 K	T_1 302.0 K
V	IV	III	II	I
Commensurate Ferroelectric $P_s // b$ Orthorhombic $C_{2v}^9 - Pb2_1m$ c	Para $\sim 10c$	Incommensurate Ferroelectric $P_s // b$	Para $\sim 8c$	Proto type Paraelectric Orthorhombic $D_{2h}^{16} - Pmcn$ c

Table 7 に V 相の点群 ($Pbnm$) と I 相のそれ ($Pb2_1m$) の Γ 点における規約表現の間の相関関係を示す。不整合相は約 8 倍から 10 倍までの不整合構造をとるが、I 相は原型相と同じユニットセルとなるので、関与するソフトフォノン Γ 点のモードとなる。V 相の B_{2u} 規約表現が I 相 ($D_{2h}^{16}\text{-Pbnm}$) の全対称表現 A_1 に対応する。いずれにしても、ソフトモードは強誘電相 ($C_{2v}^9\text{-Pb}2_1m$) では全対称表現 A_1 (基底が aa, bb, cc) に属し、原型相 (常誘電相) では B_{2u} 規約表現 (基底が $aa, bb, cc; b$) に属す¹⁹。

Table 7 Correlation of the representations at the Γ point of $Pbnm$ and those of $Pb2_1m$.

$3 A_g$	$5 A_1$
$3 A_u$	$6 A_2$
$3 B_{1g}$	$5 B_1$
$2 B_{1u}$	$5 B_2$
$3 B_{2g}$	
$2 B_{2u}$	
$3 B_{3g}$	
$2 B_{3u}$	

Figure 16 に測定方位 $b(aa)c$ のラマンスペクトルの温度依存性を示す。77 K で振動数 33 cm^{-1} のモードが昇温と共にソフト化して行き、 $T_1 = 169$ K で突然 15 cm^{-1} まで不連続に急減する。この振動数の飛びは、測定方位で検出しているフォノンの波数ベクトル k の方向に依存すると考えられる ($k // b + c$)。そこで、 $k // b$ に対応する方位 $b+c(aa)b-c$ と $k // c$ の $c-b(aa)b+c$ でのラマン

スペクトルの温度依存性も測定した。Figure 17 に方位 $b+c(aa)b-c$ のラマンスペクトルの温度依存性を示す。 $T_1=169$ K でも連続的にソフト化して行くことがわかる。

Figure 18 に方位 $b+c(aa)b-c$ での振動数および減衰定数の温度変化を示す。

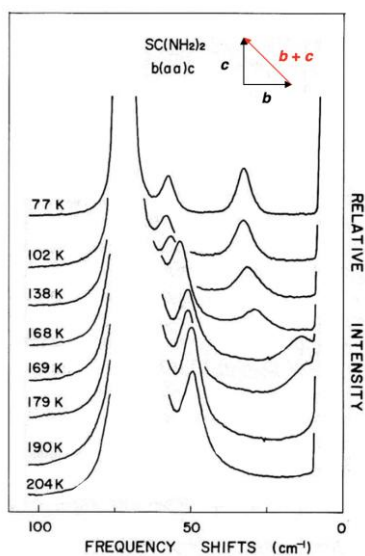


Fig. 16. Raman spectra of $SC(NH_2)_2$ for $b(aa)c$ orientation at various temperatures¹⁹⁾.

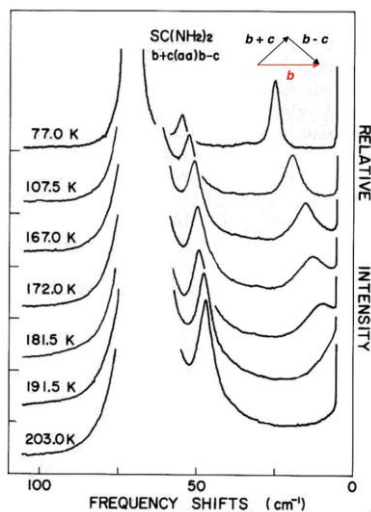


Fig. 17. Raman spectra of $SC(NH_2)_2$ for $b+c(aa)b-c$ orientation at various temperatures. Phonon wavevectors are parallel to b axis¹⁹⁾.

この波数ベクトル $k \parallel b$ のフォノン振動数は T_1 でも連続的にソフト化して行くのが確認できる。このことから、整合相の I 相では b 軸に平行な分枝がソフト化してゆくが、不整合相に入るとこの分枝のソフト化は bc 面内に広がり、原型相・不整合相転移点 T_4 において面内の全ての方向で凍結するものと考えられる。

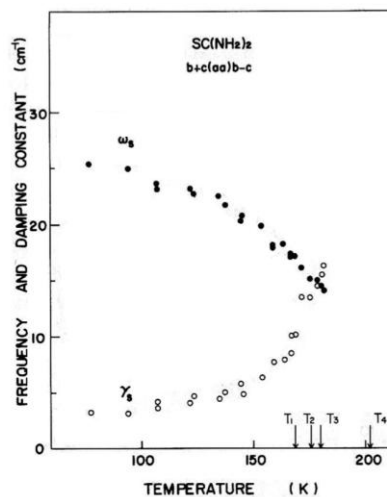


Fig. 18. Soft mode frequency ω_s and damping constant γ_s as a function of temperature. The solid circles represent ω_s and open circles represent γ_s ¹⁹⁾.

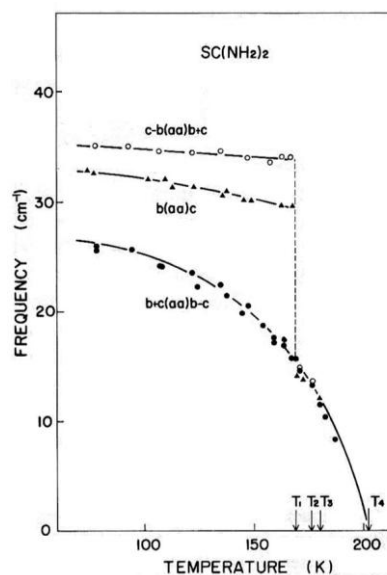


Fig. 19. Frequency of the soft mode of $SC(NH_2)_2$ for orientations $c-b(aa)c+b$, $b(aa)c$, and $b+c(aa)b-c$ as a function of temperature. Angles between q and b are 0, 45, and 90 degree, respectively¹⁹⁾.

Figure 19 に3つの方位でのソフトフォノン振動数の温度変化を示す。 T_1 以下の整合相では、 $\mathbf{k} \parallel \mathbf{c}$ のフォノン振動数はほとんど変化しないが、 $\mathbf{k} \parallel \mathbf{b}$ の振動数は T_1 でも連続的に減少し、 T_4 に向けてソフト化して行くことが確認できる。一方、 $T_1 \sim T_4$ の間の不整合相では3つのどの波数ベクトルでもソフト化して行くのがわかる。

Figure 20 に原型相 (II相) のソフトフォノンが属すると考えられる B_{2u} 規約表現 (基底: b) の2つのモードの原子変位の概念図を示す。上の図(a)の $B_{2u}(T)$ モードは $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ 分子が全体として a 軸に平行に変位する。一方、下の図(b)の $B_{2u}(L)$ モードでは分子はそれらの重心の周りに c 軸に垂直な面内で回転する。整合相 (強誘電相) の自発分極は b 軸方向に平行であることから、今回見出した B_{2u} (基底: b) 規約表現に属するソフトフォノンは $B_{2u}(L)$ モードが主たる分子の変位と考えられる。ソフトモードは不整合相と整合相では A_1 規約表現に属するためラマン活性かつ赤外活性である。一方、原型相

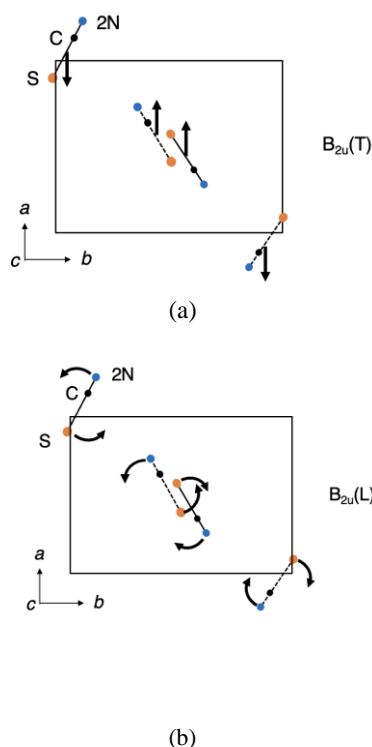


Fig. 20. Schematic drawing of B_{2u} -type symmetry-coordinates. Arrows in the upper figure(a) indicate translation of $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ molecules along the a -axis, and arrows in the lower figure(b) indicate libration of molecules in the plane perpendicular to the c -axis¹⁷⁾.

(常誘電相) では B_{2u} 規約表現に属するためラマン不活性であるが、赤外活性である。Siapakas は赤外分光およびラマン散乱測定の結果、 T_1 以下の整合相ではラマン散乱および赤外分光により典型的なソフトフォノンが確認したことを報告している²¹⁾。これは著者らの測定結果と良い一致を示している。また、原型相では赤外分光により対応するソフトフォノンが測定されている。このモードは T_1 以下の整合相で著者らが確認した A_1 規約表現に属するソフト振幅モードに対応したモードと考えられる。

彼は、 T_1 から T_4 の間の不整合相ではラマン散乱で著者らが確認した振幅モードとは異なるソフトフォノンが赤外分光では見つかったと報告している。しかしながら、不整合相では原型相で原型相 (常誘電相) では B_{2u} 規約表現に属する振幅モードがラマン活性となって確認されていることから、もし、振幅モードとは異なるソフトフォノンが存在するとすればラマン散乱でも検出されるはずである。また、位相モードであれば強誘電相でのみ観測され、その振動数も振幅モードより低いはずである。可能性があるとするれば、上述の議論 (Fig. 19) のように測定方位の問題と思われる。方位依存性を考慮した再測定が望まれる。

今回の実験結果からは、 K_2SeO_4 や Rb_2ZnCl_4 の不整合・整合相転移では振幅モードと位相モードの性質の異なる2つのソフトモードが関与し、整合相では振幅モードと位相モードの両方が光学活性 (ラマンおよび赤外活性) になり、不整合相では位相モードはゴールドストーンモードとなっており光学活性となっていないため光学測定では観測されないことが確認できた。一方、 $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ では整合相のユニットセルが元の原型相と同じであるため2つのソフトモードのみが関与しているが、整合相では振幅モードのみが観測される。これは、前者では2重縮退していた (2次元) E_2 分枝のソフト化であるのに対して、後者では Γ 点の極近傍の縮退していない (1次元) 分枝のソフト化が起因しているためである。

理論的な研究では、Yoshimitsu らと Isnibashi らの研究がある。Yoshimitsu は、チオ尿素の相転移を分子の回転振動に対する格子の不安定性として考察している。分子は重心を通り c 軸に平行な分子軸のまわりにもみ角度 (ϕ) 回転できるとし、分子間には双極子-双極子および四重極-四重極静電相互作用と他の短距離相互作用を考察している。回転振動の分散関係を求め、特に b 軸方向に分極を持ち c 軸方向に横波変調を受ける

分枝の不安定性を調べている。結論として分子間の静電的相互作用と短距離相互作用との適当な兼合いによって b 軸方向に分極を持ち、軸方向に特定の波数 q で正弦的に変調されたモード最低のエネルギーを持つことが可能であることを示した。また、現象論からの理論的アプローチについては Ishibashi and Shiba の論文に詳しいので参考にされたい²⁰⁾。

4. 2 ビフェニル

ビフェニル (Biphenyl) は、分子式 $C_{12}H_{10}$ 、構造式 $C_6H_5-C_6H_5$ のポリフェニル系炭化水素で、2つのフェニル基が単結合で共有結合した構造を持つ芳香族炭化水素である。液体状態では、2つのフェニル基はお互いになす角40度ねじれて繋がっている。結晶化すると2つのフェニル基は平面構造となる。Figure 21 にビフェニルの室温における結晶構造の概念図を示す。結晶は常温常圧では空間群 $C_{2h}^5-P2_1/c$ ($Z=2$) に属する分子化合物である。

Table 8 に逐次相転移の様子を示す。温度を下げてゆくと、 $T_1=40.4$ K で不整合構造相転移を起こし、 a 軸と b 軸の両方向に分子の向き (角度 (ϕ)), もしくはねじれ角 (θ) に併進周期の整数倍からずれる不整合相 ($q = \pm(\delta_a^* - \delta_c^*) \pm (1/2)(1 - \delta_b)b^*$) となる。さらに、 $T_2=16.8$ K で逐次転移し、 a 軸方向の周期は原型相と整合する。一方、 b 軸の方向の不整合 ($q = \pm(1/2)(1 - \delta_b)b^*$) はそのまま残る。液体ヘリウム温度まで整合相は見つかっていない。

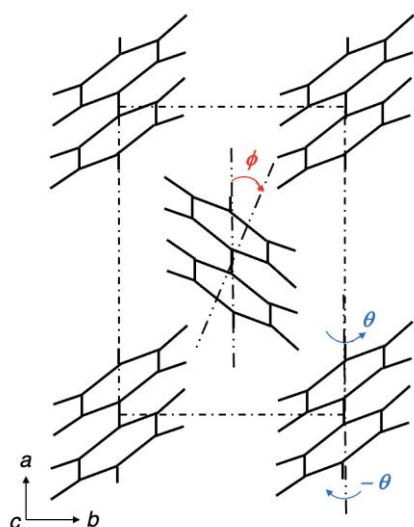


Fig. 21. Schematic drawing of crystal structure of $C_6H_5-C_6H_5$ at room temperature.

Figure 22(a)に測定方位 $x(zz)y$ におけるラマン散乱スペクトルの温度依存性を示す³¹⁾。4.5 K で 30 cm^{-1} にピークを持つ全対称モードが温度上昇に伴い固有振動数が減少してゆき $T_2=16.8$ K より高温の不整合相の 17.5 K 付近でもう一つの低振動数モードと準位反発 (level repulsion) による擬交差 (anti-crossing) を起こし、さらにソフト化して $T_1=40.4$ K より高温では完全に観測されなくなる。このモードは不整合相でも観測され $T_1=40.4$ K でソフト化することから「振幅モード」であることがわかる。4.5 K で 11 cm^{-1} にピークを持つ全対称モードが観測されるが、このモードはほとんどソフト化せず $T_2=16.8$ K 以上では観測されないことから不整合-整合相転移に関与して出現するハードモードであると考えられる。

Table 8 Successive phases transitions in Biphenyl

	T_2 16.8 K	T_1 40.4 K
III	II	I
Incommensurate Monoclinic	Incommensurate Monoclinic	Proto type Monoclinic
$q = \pm 1/2(1 - \delta_b)b^*$	$q = \pm(\delta_a^* - \delta_c^*) \pm 1/2(1 - \delta_b)b^*$	$C_{2h}^4 - P2_1/a$

次に、Fig. 22(b)に測定方位 $z(yx)y$ におけるラマン散乱スペクトルの温度依存性を示す。4.5 K で 40 cm^{-1} 以下にピークを持つ5つのモードが見出される。このうちの3つは T_2 以上の不整合相ではラマン不活性となり観測されない。残りの 18 cm^{-1} と 29 cm^{-1} の2つのモードは温度が T_2 に近づくにつれて1つのピークに合体して、 T_1 以上の原型相でも観測されている。

また、この原型相-不整合相転移温度 T_1 近傍ではレーリーウイング (Rayleigh wing) の増大が見られる。これらのことから、このモードはソフトフォノンではなく、Bruce 等によって提唱された (Precursor-order-induced hard-mode) ではないかと推測される。

通常分子化合物結晶の相転移では分子の形状はほとんど変化しない。結晶構造 (格子) は分子間力のエネルギーと分子内の電子エネルギーとの総和がより低い状態で安定となるが、一般的には電子エネルギーの方が大きく、分子間力のエネルギーは無視でき、分子そのものの形状は変化しない。ところが、ビフェニルはフェニル基が蝶々の羽のように繋がっており、両者の角度 (θ) が捻れたり、向き (ϕ) が変化したりしやすい構造となっている。このことが不整合構造相転移の原因と考えられる。分子動力学による議論が望まれる²⁷⁾。

がき」でも紹介したようにそれぞれの物質群によって千差万別である。

本稿「誘電体結晶における不整合・整合構造相転移の分光学的研究」では、逐次相転移を起こす誘電体の中に転移後のユニットセルのサイズが元の原型相の整数倍でない不整合相と呼ばれる中間層が現れる強誘電体の研究について紹介した。不整合・整合構造相転移機構の解明のために以下の強誘電体等の構造相転移に関する研究結果、特に分光学的測定結果を中心に以下の4種類の誘電体について紹介した。

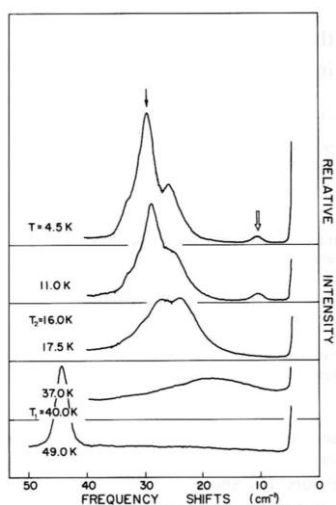
1. セレン酸カリ (K_2SeO_4)
2. 塩化亜鉛ルビジウム (Rb_2ZnCl_4)
3. チオ尿素 ($SC(NH_2)_2$)
4. ビフェニル ($C_6H_5-C_6H_5$)

最初に、不整合・整合構造相転移研究のブレークスルーとなった K_2SeO_4 の相転移について詳しく紹介した特徴的なソフトフォノンモードである「振幅モード」と「位相モード」を中心に実験結果に基づき不整合相-強誘電相転移について考察した。この2つのソフトモードは群論的考察により予測され、その存在がラマン散乱測定により実証された経緯についても紹介した。

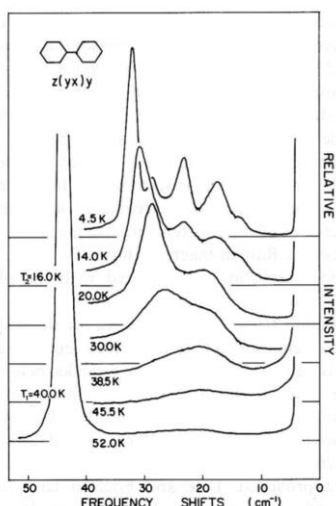
Iizumiらの中性子散乱による K_2SeO_4 の不整合・整合相転移の研究成果がきっかけとなって、これまで原子・分子間のクーロン力の長距離相互作用が偶然生み出した特殊な変調構造を含む逐次構造相転移と見做されていた現象が、その後の実験的理論的研究によって補強された。これにより、強磁性体のスピンの螺旋構造や液晶における変調構造、電荷密度波が主役である低次元伝導体での変調構造と同様に、強誘電体の不整合・整合相転移が固体物理学の中の一つの研究分野として発展したことに言及した。

続いて、 K_2SeO_4 と結晶構造がよく似た Rb_2ZnCl_4 の複雑な逐次相転移に関与する複数のソフトフォノンの測定結果を紹介した。ラマン散乱により不整合・整合構造相転移に関与する振幅モードおよび位相モードが確認されたことと、 K_2SeO_4 とでは出現しないより低温の強誘電相に関与するソフトフォノンも確認しこの相転移も変位型であることを示した。

次に、分子性結晶のチオ尿素とビフェニルでは、まず、チオ尿素の場合は、 K_2SeO_4 や Rb_2ZnCl_4 の不整合・整合相転移では振幅モードと位相モードの性質の異なる2つのソフトモードが関与し、整合相では振幅モー



(a)



(b)

Fig. 22. Raman spectra of biphenyl (a) for $x(yy)z$ and (b) $z(yx)y$ orientation at various temperatures³¹⁾.

5. まとめ

結晶の個々の物性はその構造に起因することは当然である。特に、構造相転移は特定の温度や圧力において、最近接場と遠距離相互作用の微妙な兼ね合いのすえにフォノンもしくは緩和モードがソフト化して出現する。不整合・整合構造相転移も、元々の結晶の周期を決定していた近距離相互作用に遠くのユニットセルまで届く遠距離相互作用が打ち勝つことで出現すると考えられる。遠距離相互作用の起因と性質は、「まえ

ドと位相モードの両方が光学活性（ラマンおよび赤外活性）になり、不整合相では位相モードはゴールドストーンモードとなっており光学活性となっていないため光学測定では観測されないことが確認できた。一方、 $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ では整合相のユニットセルが元の原型相と同じであるため2つのソフトモードのみが関与しているが、整合相では振幅モードのみが観測される。これは、前者では2重縮退していた（2次元） Σ_2 分枝のソフト化であるのに対して、後者では Γ 点の極近傍の縮退していない（1次元）分枝のソフト化が起因しているためであることを議論した。

最後に4のビフェニルではビフェニル ($\text{C}_6\text{H}_5\text{-C}_6\text{H}_5$) 分子が永久双極子能率を持たないためチオ尿素の場合と異なり強誘電性は観測されていない。また、低温まで整合相は観測されていない。不整合構造の現れる原因はフェニル基が蝶々の羽のように繋がっており、両者の角度 (θ) が捻れ安かったり、向き (ϕ) が変化しやすかったりした構造となっている。このことが不整合構造相転移の原因と考えられることを紹介した。

謝 辞

本解説で紹介した研究成果の多くは、著者が博士課程の院生として在籍し、引き続き助手として在職していた名古屋大学工学部・人工結晶研究施設の故高木豊名誉教授、石橋義弘名誉教授、岡山大学の故澤田昭勝名誉教授、当時助手をされていた緑川道夫先生のご指導の賜物であります。名古屋大学工学部応用物理学科の、阿部隆司名誉教授、八田一郎名誉教授、原田仁平名誉教授、日本原子力研究所の M. Iizumi 博士、チェコ科学アカデミー強誘電体研究所長の故 Dr. V. Dvorak と Dr. J. Petzelt に有益な議論をいただいた。ここにお名前を記して感謝申し上げます。また、人工結晶研究施設の高木研究室で共に学んだ杉山純博士、折原宏博士をはじめとする院生と卒研生に感謝いたします。

本研究は科研費等の研究助成がなければ到底成し得なかったものです。ここに、ご支援をいただいた関係機関に感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 中村輝太郎, 作道恒太郎, 石橋善弘, 富永靖徳, “強誘電体と構造相転移”, *裳華房*, (1988).
- 2) 徳永正晴, “誘電体”, *培風館: 新物理学シリーズ* 25,

- (1992).
- 3) 高重正明, “物質の構造と誘電体入門”, *裳華房*, (2003).
- 4) 石橋善弘, “強誘電体入門”, *森北出版*, (2020).
- 5) 石橋善弘, “格子振動と構造相転移”, *森北出版*, (2023).
- 6) Y. Akio; A New Type of Antiferromagnetic Structure in the Rutile Type Crystal: *J. Phys. Soc. Jpn.*, **14**, 807 (1959).
- 7) M. Uchida, Y. Onose, Y. Matsui, and Y. Tokura; Real-Space Observation of Helical Spin Order: *Science*, **311**, 359 (2006).
- 8) 折原宏; “液晶の物理 (材料学シリーズ)”: 内田老鶴圃, (2004).
- 9) 長岡洋介, 安藤恒也, 高山一; “局在・量子ホール効果・密度波”: *岩波書店*, (1993).
- 10) R. A. Cowley and A. D. Bruce: The Theory of Structurally Incommensurate System: I. Disordered-Incommensurate Phase Transitions; *J. Phys.* **C11**, 3577 (1978).
- 11) V. Dvorak and J. Petzelt; Infrared and Raman Activity of Soft Modes in the Incommensurate Structure: *J. Phys.* **C11**, 4827 (1978).
- 12) P. M. de Wolf, T. Janssen, and A. Janner; The Superspace Groups for Incommensurate Crystal Structures with a One-Dimensional Modulation: *Acta Crystallogr.* **A37**, 625 (1981).
- 13) Y. Ishibashi; Landau-Theoretical Consideration of Incommensurate Phase Transitions Ferroelectric and Ferroelastic Substances: *Ferroelectrics*, **35**, 111 (1981).
- 14) V. Dvorak, V. Janovec, and Y. Ishibashi; Symmetry of Macroscopic Properties in Incommensurate Structures: *J. Phys. Soc. Jpn.*, **52**, 2053 (1983).
- 15) Y. Yamada, I. Shibuya, and S. Hoshino; Phase Transition in NaNO_2 : *J. Phys. Soc. Jpn.*, **18**, 1594 (1963).
- 16) K. H. Michel; Microscopic Theory of Lattice Instability and Incommensurate Phase Transition in NaNO_2 : *Phys. Rev.* **B24**, 3998 (1981).
- 17) A. L. Solomon; *Phys. Rev.* **104**, 1191 (1956).
- 18) Y. Shiozaki; Satellite X-ray scattering and structural modulation of thiourea: *Ferroelectrics*, **2**, 245 (1971).
- 19) M. Wada, A. Sawada, Y. Ishibashi, and Y. Takagi; Raman Scattering Spectra of $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$: *J. Phys. Soc. Jpn.*, **45**, 1905 (1978).
- 20) Y. Ishibashi and H. Shiba; Successive Phase Transition in Ferroelectric NaNO_2 and $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$: *J. Phys. Soc. Jpn.*, **45**, 409 (1978).
- 21) D. I. Siapkis; Soft Mode in the Disordered-Incommensurate-Commensurate Phase Transitions of Thiourea: *Ferroelectrics*, **29**, 29 (1980).

- 22) K. Yoshimitsu and T. Matsubara; Theory of Sinusoidal Antiferroelectricity in Thiourea: Progress of Theoretical Physics, **69**, 465 (1980).
- 23) F. Denoyer, A. H. Moudden, R. Currat, C. Vettier, A. Bellamy, and M. Lambert; Effect of Hydrostatic Pressure on Modulated Structures in Thiourea: *Phys. Rev.* **B25**, 1697 (1982).
- 24) T. A. Aslanyan and A. P. Levanyuk; On the Possibility of the Incommensurate Phase near a \rightleftharpoons b Transition Point in Quartz: *Solid State Commun.*, **31**, 521 (1979).
- 25) G. Dolino and J. P. Bachheimer; Observation of an Intermediate Phase near a \rightleftharpoons b Transition of Quartz by Heat Capacity and Neutron Scattering Measurements: *Solid State Commun.*, **45**, 295 (1983).
- 26) A. Bree, M. Edelson and R. A. Kydd; The polarized i.r. spectrum of biphenyl and biphenyl-d10: *Spectrochim. Acta*, **31A**, 1569 (1975).
- 27) J.L. Baudour and M. Sanquer; Structural phase transition in polyphenyls. VIII. The modulated structure of phase III of biphenyl ($T \approx 20$ K) from neutron diffraction data: *Acta Cryst. B*, **39**, 75 (1983).
- 28) J.L. Baudour; Structural phase transition in polyphenyls. X. Potential barrier heights in crystalline polyphenyls and in gaseous biphenyl determined uniquely from diffraction data: *Acta Cryst. B*, **47**, 935 (1991).
- 29) H. Cailleau, F. Moussa, and J. Monst; Incommensurable Phases of Biphenyl: *Solid State Commun.*, **31**, 521 (1979).
- 30) H. Cailleau, F. Moussa, C. E. M. Zeyen, and J. Bouillot; Observation of Excitations in the Incommensurable Phases of Biphenyl by Inelastic Neutron Scattering: *Solid State Commun.*, **33**, 407 (1980).
- 31) M. Wada, A. Sawada, and Y. Ishibashi; Soft Modes Associated with Incommensurate Phase Transitions in Biphenyl: *J. Phys. Soc. Jpn.*, **50**, 737 (1981).
- 32) Y. Ishibashi; A. Tentative Phenomenological Theory of Incommensurate Phase Transition in Biphenyl: *J. Phys. Soc. Jpn.*, **50**, 1255 (1981).
- 33) K. Saito, K. Kikuchi, and I. Ikemoto; Incommensurate Crystal-Instability and a Role of Internal Degrees of Freedom in Bis(4-Chlorophenyl) Sulfone Molecules: *Solid State Communications*, Vol. 81, No. 3, pp. 241-243, 1992.
- 34) J. Schunck and F. Denoyer; Incommensurate Phases in Barium Sodium Niobate: *Phys. Rev.* **B23**, 383 (1981).
- 35) J. Schunck, J. C. Toledano, C. Joffrin, J. Aubree, B. Joukoff, and A. Gebelotoud; Neutron Scattering Studies of the Tetragonal to Incommensurate-Ferroelastic Transition in Barium Sodium Niobate: *Phys. Rev.* **B25**, 1766 (1982).
- 36) Y. Noda, M. Mori, and Y. Yamada; Successive Jan-Teller Phase Transition in $K_2PbCu(NO_2)_6$: *J. Phys. Soc. Jpn.*, **45**, 954 (1978).
- 37) D. E. Cox, S. M. Shapiro, R. J. Nelmes, T. W. Ryan, H. T. Bleif, R. A. Cowley, M. Eibschütz, and H. J. Guggenheim; X-Ray and Neutron Diffraction Measurements on $BaMnF_4$: *Phys. Rev.* **B28**, 1640 (1983).
- 38) L. Bernard, R. Currat, P. Delamoya, C. M. E. Zeyen, S. Hubert, and R. de Kouchkovsky; Neutron Scattering Investigation of Incommensurate $ThBr_4$: *J. Phys.* **C16**, 433 (1983).
- 39) N. Yamamoto, K. Yagi, G. Honjo, M. Kimura and T. Kawamura; New Phases of $Sr_2Ta_2O_7$ and $Sr_2Nb_2O_7$ Found by Electron Microscopy and Diffraction: *J. Phys. Soc. Jpn.*, **48**, 185 (1980).
- 40) K. Geshi and M. Iizumi; Neutron Scattering Studies of Improper Ferroelectric and Incommensurate Phase Transitions: *Ferroelectrics*, **24**, 229 (1980).
- 41) F. Frey, H. Jagodzinsky, A. Pietraszko, and C. Zeyen; Diffuse Scattering and Phase Transition in $RbLiSO_4$ Investigated by Neutron Scattering: *Solid State Commun.*, **46**, 557 (1983).
- 42) K. Shimaoka, N. Tsuda, and Y. Yoshimura; Incommensurately Modulated Structure of K_2SeO_4 : *Acta Crystallogr. A. Suppl.* **28**, 187 (1972).
- 43) H. Terauchi, H. Takenaka, and K. Shimaoka; Structural Phase Transition in K_2SeO_4 : *J. Phys. Soc. Jpn.*, **39**, 435 (1975).
- 44) M. Iizumi, J. D. Axe, G. Shirane, and K. Shimaoka; Structural Phase Transformation in K_2SeO_4 : *Phys. Rev.* **B15**, 4392 (1977).
- 45) V. Fawcett, R. J. B. Hall, D. A. Long, and V. N. Sankaranarayanan; A Raman spectroscopic study of the ferroelectric phase transition in K_2SeO_4 : *J. Raman Spectroscopy*, **2**, 629 (1974).
- 46) M. Wada, A. Sawada, Y. Ishibashi, and Y. Takagi; Raman Scattering Spectra of K_2SeO_4 : *J. Phys. Soc. Jpn.*, **42**, 1229 (1977).
- 47) M. Wada, H. Uwe, A. Sawada, Y. Ishibashi, Y. Takagi, and T. Sakudo; The Lower Frequency Soft-Mode in the Ferroelectric Phase of K_2SeO_4 : *J. Phys. Soc. Jpn.*, **43**, 544 (1977).
- 48) J. D. Axe, M. Iizumi, and G. Shirane; Lattice Dynamics of Commensurate and Incommensurate K_2SeO_4 : *Phys. Rev.* **B22**, 3408 (1980).
- 49) M. Wada, H. Shichi, A. Sawada, and Y. Ishibashi; The Uniaxial Stress Effect on Normal-Incommensurate Phase Transition in K_2SeO_4 -Observations of the Amplitude Mode by Raman Scattering-: *J. Phys. Soc. Jpn.*, **51**, 3245 (1982).

- 50) S. Sawada, Y. Shiroishi, A. Yamamoto, M. Takashige, and M. Matsuo; Ferroelectricity in Rb_2ZnCl_4 : *J. Phys. Soc. Jpn.*, **43**, 2099 (1977).
- 51) M. Wada, A. Sawada, and Y. Ishibashi; The Observation of Soft Mode in Rb_2ZnCl_4 by Raman Scattering: *J. Phys. Soc. Jpn.*, **45**, 1429 (1978).
- 52) M. Wada, A. Sawada, and Y. Ishibashi; Experimental Study of the Low Temperature Phase Transition of Rb_2ZnCl_4 : *J. Phys. Soc. Jpn.*, **45**, 1429 (1978).
- 53) K. Gesi and M. Iizumi; Neutron Scattering Study on the Incommensurate Phases in Ferroelectric Rb_2ZnCl_4 and K_2ZnCl_4 : *J. Phys. Soc. Jpn.*, **46**, 697 (1979).
- 54) F. Franke, M. Le Postollec, J. P. Mathieu, and H. Poulet; : *Solid State Commun.*, **33**, 155 (1980).
- 55) R. Blinc, S. Juznik, V. Rutar, J. Seliger, and S. Zummer; 87Rb Spin-Lattice Relaxation in the Incommensurable Phase of Rb_2ZnCl_4 : *Phys. Rev. Lett.*, **44**, 609 (1980).
- 56) H. Shimizu, N. Abe, N. Kokubo, N. Yasuda, S. Fujimoto, T. Yamaguchi, and S. Sawada; Pressure Induced Ferroelectricity in $[(\text{NH}_3)_4]_2\text{FeCl}_4$: *Solid State Commun.* **34**, 363 (1980).
- 57) A. Sawada, J. Sugiyama, M. Wada, and Y. Ishibashi; Incommensurate-Ferroelastic (Commensurate) Phase Transition in $[(\text{NH}_3)_4]_2\text{CuCl}_4$: *J. Phys. Soc. Jpn.*, **48**, 1773 (1980).
- 58) J. Shugiyama, M. Wada, A. Sawada, and Y. Ishibashi; Successive Phase Transition in $\{\text{N}(\text{CH}_3)_4\}_2\text{CuCl}_4$: *J. Phys. Soc. Jpn.*, **49**, 1405 (1980).
- 59) M. Wada, M. Suzuki, A. Sawada, Y. Ishibashi, and K. Gesi; Ferroelectricity in $[(\text{NH}_3)_4]_2\text{CuBr}_4$: *J. Phys. Soc. Jpn.*, **50**, 1813 (1981).

卒業研究紹介 —3D パズルの製作—

小林義和*

Introduction to Graduation Research

— 3D Puzzle Fabrication —

Yoshikazu KOBAYASHI

1. はじめに

3D プリンタは工業や医療分野など多くの分野で応用が進み、認知度は向上している。しかし、より広い分野への応用を考えた場合、3D プリンタを利用するアプリケーションソフトはまだ十分とは言えない。そこで本研究室では令和5年度から、3D パズルを製作するソフトウェアを開発し、3D プリンタにより造形する卒業研究を行っている^{1,2)}。本報では、3D パズルの製作方法と、過去2年間における3D パズルの活用事例について報告する。

2. 3D パズルの製作

2.1 製作手順

図1にパズル製作の手順を示す。最初にパズル化する対象物の形状をSTLフォーマットに変換した後、一辺が任意の長さを持つボクセル集合に再変換する。これらボクセル集合に対してパズルのピース数を指定し、各ピースに含まれるボクセルが所定の数になるように分割する。

ボクセル集合からのパズル化は、画像処理分野で用いられる4近傍輪郭追跡によるラベリング処理のアルゴリズム³⁾を応用した。ボクセル化された形状は図2のような形状を内包するボクセルで構成された直方体内に存在するとして、図3に示すような基準ボクセルを中心に隣接6近傍を考え、3次元的に画像処理と同じ考え方でラ

ベリング処理を行う。なお、図内の数字は検索する順序を示している。そのラベリング処理の過程で、ボクセルを数え、各ピースのボクセル数になったらラベリング処理をやめ、一つのピースを完成させる。そして、基のボクセル集合から完成したピースのボクセルを除いたボクセル集合を再びラベリング処理し、次のピースを作る。

2.2 製作結果

上述のアルゴリズムを用いパズルデータを作成した例を図4に示す。図4(a)は7201ボクセルからなるカエル形状を6ピースのパズルにした例である。また、図4(b)は280と4224ボクセルの球形を8ピースに分けた例である。なお、各ピースは異なる色で表している。

以上のようにピース毎のパズルデータができたので、そのデータを使い3Dプリンタにより実際のパズルの製作を行った。今回の製作ではFDM(Fused Deposition Modeling)型の3Dプリンタを使用した。製作例を図5に示す。図5(a)は図4(b)の4224ボクセルの球をパズル化したものである。また、図5(b)はイベント出展用に異なる形状をパズル化した例である。基の形状を忠実に再現するにはボクセル数を多くする必要があるが、多くするとその分ピース間の接合面が複雑になりパズルの難易度が上がる。製作時には形状の再現性とパズルの難易度の調和が必要となる。

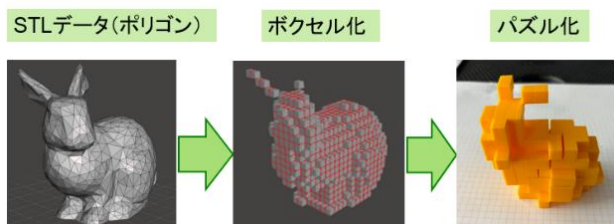


図1 パズル製作の手順

受理 2025年10月31日

採択 2025年11月28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 Electrical Systems Engineering,
Nagano Prefecture Nanshin Institute of Technology,
8304-190 Minamiminowa, Nagano, 399-4511 Japan

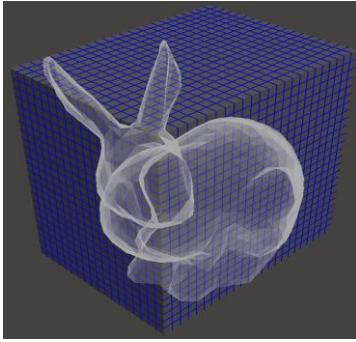


図2 形状とボクセル空間

3. 3D パズルの展開

3.1 科学ふれあいフェアでの出展

令和6年10月5日に開催された「科学ふれあいフェア」に3Dパズルを数点出展し、小学生に体験してもらった。体験の様子を図6に示す。3Dパズルのピース数は少ないが2Dパズルと比べると難しいようである。図5(a)の球形状のパズルは8ピースしかないが、途中であきらめる人が多かったが、1時間程使い完成させた小学生もいた。イベント後のアンケートを見ると楽しかったと書いてくれた小学生もおり、概ね好評だった。

3.2 校内インターンシップの教材

令和7年7月30日から8月1日に行われた高校生向け校内インターンシップに教材として用いた。担当した内容のタイトルは「3Dパズルの作製（形状処理の基礎と応用）」であり、形状処理の内容の一端としてボクセルを使った形状表現について学習し、その後3Dパズル



(a)カエル形状



(b)球形状

図4 作成したパズルデータ例

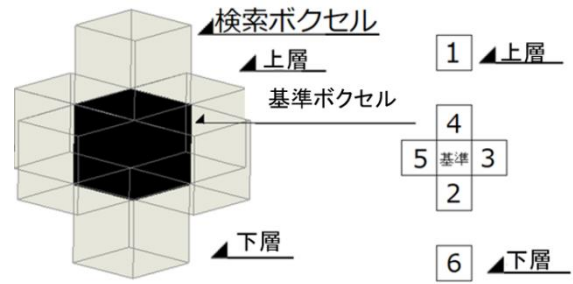


図3 隣接6近傍

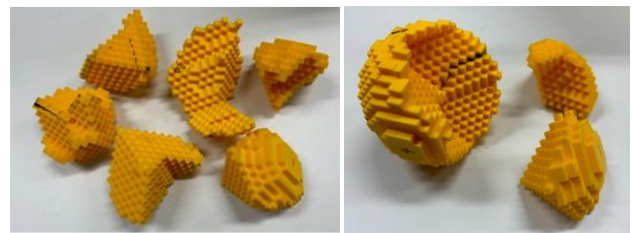
を作った。この時に高校生が作った3Dパズルを図7に示す。円柱形状をボクセル化し、4ピースのパズルを作った。

3.3 今後の展開

大型の3Dプリンタ造形物は、分割して造形する必要がある。その際、分割されたパーツ間の接合強度が問題となる場合がある。今回開発したパズル化アルゴリズムは、接合面が階段状になる特徴を持つ。この特徴を活かし、接合強度の高い接合面を実現するため、本アルゴリズムの応用を検討している。

4. まとめ

令和5年度から卒業研究として3Dパズルの製作を目的に、ソフトウェアの開発と3Dプリンタを用いた実際のパズル製作を行った。製作したパズルは各種イ



(a)図4(b)の球形状(4224ボクセル)の製作例



(b)いろいろな形状

図5 3Dパズルの製作例



図6 科学ふれあいフェアへの出展

メントに出展している。今後は、大型3Dプリンタ造形物の接合強度向上に関する研究への応用を検討している。

参 考 文 献

- 1) 久保田大智：3Dパズルの製作，令和5年度長野県南信工科短期大学校機械システム学科卒業論文

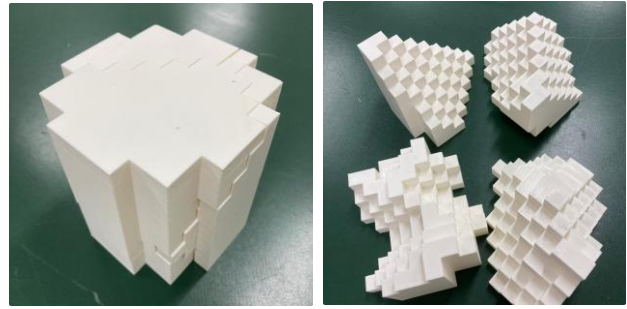


図7 校内インターンシップでの作品

- 2) 漆戸陽規：3Dパズル製作における形状データ作成アルゴリズムの改良，令和6年度長野県南信工科短期大学校機械システム学科卒業論文
- 3) デジタル画像処理，公益財団法人画像情報教育振興協会(CG-ARTS)発行，PP.198-207

オシロスコープによる校章の表示

倉澤勝美*

Displaying the emblem on an oscilloscope

Katsumi KURASAWA

1. まえがき

オシロスコープは主として交流電圧や過渡現象に伴う電気信号の変化を表示・計測する装置である。オシロスコープには XY モードと呼ばれる表示モードがあり、これを用いることでリサージュ図形などの 2 次元図形を表示することができる。

この XY モードを活用してオシロスコープ（主としてブラウン管表示型のアナログオシロスコープ）に様々な静止画像や動画を表示する試みが 2008 年頃には、ニコニコ¹で流行っていた。その後、この技術は「オシロお絵描き」や「お城スコープ」などに発展して現在に至っている。

このような背景から、本校でもオシロスコープを用いた静止画像や動画の表示を検討した。校内見学の展示物として、保有するデジタルオシロスコープに静止画像である校章を表示したので報告する。なお、制御については一筆書きのように制御点を順番に辿ることで描画を実現した。

2. システムの概要

本研究で開発した表示システムの構成を Fig. 1 に示す。Arduino UNO を中心とした制御回路により、X 座標および Y 座標の電圧値を、それぞれ DAC を介して出力し、オシロスコープの Ch.1 および Ch.2 に接続することで XY モード表示を実現している。

Arduino UNO には Digital-Analog Converter（以下、

受理 2025 年 10 月 30 日

採択 2025 年 11 月 19 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

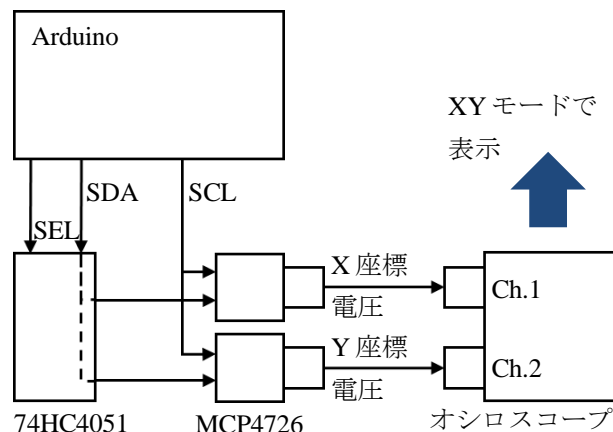


Fig. 1 Display system connection diagram.

DAC) が付属していないため、本校で保有する 12bit DAC である MCP4726 を 2 つ用いて X 座標、Y 座標に該当する電圧値として出力した。MCP4726 の VREF ピンは開放とし、Arduino から取得した電源 (5V) ラインを基準電圧とした。デジタル値から電圧への変換式は以下ようになる。

$$V_{out} = D \cdot \frac{5}{4096} \quad (1)$$

また、Arduino から MCP4726 への通信には I2C を用いるが、保有している MCP4726 の I2C アドレスは 0x60 のみであり、ユーザサイドで変更することができなかった。I2C デバイスはアドレスを用いて通信するデバイスを指定するが、同じアドレスを持つデバイスであるため、信号線を切り替えて通信を行う必要がある。このため、アナログマルチデマルチプレクサ 74HC4051 を用いて 2 つの MCP4726 を切り替えることとした。

これらの追加 IC は Arduino シールド基板上に実装した。製作した制御回路の回路図を Fig. 2 に示す。図では一部の電源線を省略しているが、基板の電源は Arduino の 5V 電源から供給される。

X 座標に該当する電圧値をオシロスコープの Ch.1 で、

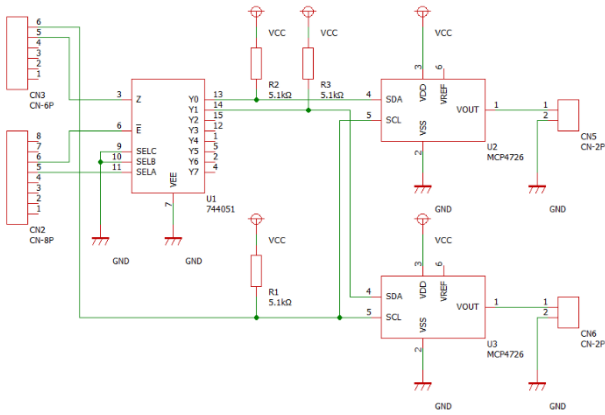


Fig. 2 Control circuit.

Y座標に該当する電圧値をオシロスコープのCh.2で計測し、オシロスコープのXYモードを用いて表示することで、描画したい線図をオシロスコープの表示画面に表示させることができる。

3. 校章の座標データ化

本校の校章を Fig. 3 に示す。



Fig. 3 The emblem of

Nagano Prefecture Nanshin Institute of Technology.

校章は斜め45°の直線から構成されている。制御を簡素化するために校章を構成する直線はすべて45°とみなして座標値への変換を行った。これによる歪みはほとんど見られなかった。

また、一筆書きでたどれるように方向の転換点を制御点として座標値を見積もった。完全に一筆書きでは辿れないため、一部の直線については重複して辿ることとした。

これらにより、制御用の座標データに変換した。画像の左下を原点である(0,0)とし、座標値データを整数値で表すことができるように調整し、左右方向の長さを80とした。

作成した制御用の座標データを Table 1 に示す。各点は一筆書きの順序に従って並べられており、X座標およびY座標は整数値で表記している。

また、制御点を図示したものを Fig. 4 に示す。一部の直線を重複描画するため、制御点番号1と11のように制御点も重複している箇所がある。

Table 1 Coordinates of control points.

制御点番号	X座標	Y座標
1	5	35
2	0	40
3	28	68
4	56	40
5	58	42
6	42	58
7	52	68
8	73	47
9	54	28
10	26	56
11	5	35
12	0	40
13	28	68
14	56	40
15	68	52
16	75	45
17	80	40
18	52	12
19	24	40
20	22	38
21	38	22
22	28	12
23	7	33
24	26	52
25	54	24
26	75	45
27	80	40
28	52	12
29	24	40
30	12	28

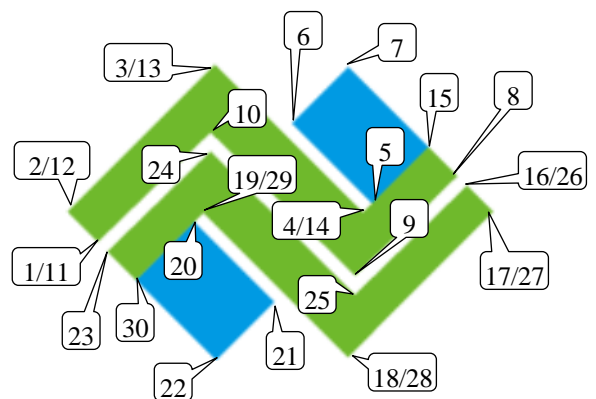


Fig. 4 Control points.

4. 制御プログラム

制御プログラムはC言語で作成した。制御点の座標データを配列に格納し、移動する直線の角度に応じてインクリメントあるいはデクリメントすることで座標を移動させた。すべて45°の直線と仮定したため、X,Yの座標値はどのタイミングでも必ず1ずつ変化することになり、描画処理を簡素化することができた。

プログラムの出力値は12bit DACの入力値となるため、12bitの2進数である0~4095の範囲に変換する必要がある。プログラム内では、座標値を5bit左シフトし、32 (= 2⁵) 倍の値として出力した。これにより、座標値の最大値である80が32倍されて2560となり、これをDACにデジタル値として出力する。式(1)により電圧に変換すると3.16VがDACから出力されることになる。これは電源電圧の5Vを下回っており、出力する上で問題ない値である。

5. 製作した回路の評価

製作したシステムを動作させ、オシロスコープの設定をXYモードとするとFig. 5に示す画面が表示された。



Fig. 5 Output of the display system.

輪郭や構成要素などについては、およそ校章と同じ形状が表示されており、おおむね描画は成功したと判断できる。

しかし、描画部分が太くなってしまっており、一部の細かなデザインがつぶれてしまった。これは、2つのDACの出力制御信号を切り替える際に、アナログマルチデマルチプレクサを経由して交互に出力を変化させているため、出力が階段状に変化することに起因すると考えられる。今後、DACの出力段にアナログラッチを追加し

て、2つのDACからの出力が同時に変化するようにすることで、描画精度の向上が期待できる。

6. むすび

本研究では、オシロスコープのXYモードを活用し、校章の静止画像を表示するシステムを構築した。ArduinoとDACを用いた電圧制御により、座標データを描画することが可能であることを確認し、表示結果は概ね良好であった。

一方で、描画線の太さの影響で細部が潰れるといった課題も確認された。これはDAC出力の切り替えタイミングに起因するものであり、今後はアナログラッチの導入などにより出力の同期性を高めることで、さらなる描画精度の向上が期待される。

本システムは、オシロスコープの教育的・展示的な活用方法として有効であり、電子回路や制御技術の理解促進にも寄与する可能性がある。今後は、精度の向上に加え、より複雑な図形やアニメーションなどの動画の表示などを探っていきたい。

参考文献

- 1) DWANGO Co., Ltd., “ニコニコ”,
<https://www.nicovideo.jp/>.

【事例紹介】

2024 年度総合課題の取り組み紹介

学務委員会 荒川 進

1. はじめに

長野県南信工科短期大学校（以下、本校）では、開校以来「総合課題」という科目をカリキュラムに取り入れている。「総合課題」は、機械システム学科、電気システム学科両学科共通の授業である。「総合課題」では、両学科の学生が混在したチームを構成し、協力して作品を製作する授業で、1年次の集大成と位置づけられる。この授業は、学科の専門性にとらわれず、異分野の技術に触れると同時に情報共有を通じたコミュニケーション能力を養うことを目的とする。学生は、自分たちのアイデアを“かたち”や“うごき”にした作品の製作を通じ、社会で実践されるものづくりの流れを学ぶ。ものづくりの流れには、テーマ（市場のニーズ）に即した企画の提案，設計，試作，検証，製作さらには成果発表を含み，これらを学生主体で行う。また，ものづくりのための予算管理も学生自ら行う。これまでの「総合課題」の取り組みについては本校の紀要で紹介している¹⁻¹⁶⁾。

令和6年度は、前年度につづき、大きなテーマとして校内外で開催されるイベントに出展し、来場者が体験できる作品を設定した。テーマに即した学生からの提案を投票という形で選定し、5つのテーマについて取り組んだ。選定したテーマとその概要を表1に示す。

表1 2024 年度総合課題のテーマと概要

チーム	テーマ名	概要
1	メタルピンボール	フルメタルボディで“超エキサイティング”を体感できるピンボールゲーム
2	シューティングゲーム	銃から発射されるレーザーを動く標的に当て、標的を倒すシューティングゲーム
3	レーザーパズル	レーザー光を屈折させるブロックを上手に配置して、レーザー光をゴールまで導くパズルゲーム
4	対戦型ピンポンゲーム	磁石の力で移動する鉄球を LED 光で表現したラケットで打ち返す 4 人対戦型のピンポンゲーム
5	脳トレーション!	記憶力と瞬発力を発揮する“脳トレーション”ゲーム。暗所ではイルミネーションとして楽しめる。

2. 各テーマの紹介

2. 1 「メタルピンボール」

2. 1. 1 コンセプト

「メタルピンボール」は，“ピンボールをド派手にする”という企画者の情熱を実現すべく製作に取り組んだ。コンセプトは，“子どもから大人まで楽しめるピンボールをつくる”である。図1に彼らが作製した説明用のパネルを示す。



図1 「メタルピンボール」説明用パネル

「メタルピンボール」の製作チームは、チームを会社組織になぞらえ、役割分担と同時に責任を持たせるチーム組織を構築したのが特徴である。さらに、設計工程では定期的にチーム内DR（デザインレビュー）を実施し、設計段階でのミス洗い出し、手戻り撲滅と設計（方針）の共有を進めた。

「メタルピンボール」は、ゲーム中に盤面を傾斜させる機構を有し、ゲームの難易度を変化させることができる。また、ボールが転がる盤面に GOT を埋設し GOT の画面上でのボールの通過を点数としてカウントする斬新なアイデアが盛り込まれている。

2. 1. 2 構造

「メタルピンボール」は、耐久性を追求した設計となっている。デザインは、「メタルピンボール」にふ

さわしい、メタリックなディテールとなっている（図2）。ゲームには、 $\phi 30\text{ mm}$ の鉄球を用いた。この鉄球の放出装置には、傾斜した盤面でも力強く射出できるソレノイド機構を選定した。盤面は、クランク機構によって傾斜角度を変化させることができる。盤面に埋設された GOT は、鉄球の通過によるタッチ操作の感度を向上させるためタッチパネル表面にシリコン樹脂シートを張り付ける工夫がされている。



図2 「メタルピンボール」の全景

2. 1. 3 製作結果

通常のピンボールゲームにはない盤面が傾斜する機構を取り入れることができた。感圧式のタッチ操作が可能な GOT を盤面に埋設し、鉄球が通過するときの圧力感知によって点数をカウントする独自の設計が実現できた。全体として体験する人の高揚感を掻き立てるアイデアを実現することができた。

なお、「メタルピンボール」は、2025年6月に開催された「諏訪圏工業メッセ2025（主催：諏訪圏工業メッセ実行委員会）」に出展し、多くの来場者に体験してもらうことができた。

2. 2 「シューティングゲーム」

2. 2. 1 コンセプト

「シューティングゲーム」のコンセプトは、「最低限遊べるシューティングゲームを製作する」である。“最低限”という控えめな表現ではあるが企画者のアイデアを実現した作品となっている。校内外のイベントで「いろんな人に楽しい体験をしてもらう」という目標を掲げ製作に取り組んだ。

銃で的を倒す“射的ゲーム”を基本とするが、銃からは“弾”ではなく“レーザー”を照射する。レーザーが的に設置したセンサーに反応して、当たりを判定する設計とした。ゲームは、制限時間内にいくつ

の的を倒せるかをスコアとして競う。図3に説明用のパネルを示す。



図3 「シューティングゲーム」説明用パネル

2. 2. 2 構造

「シューティングゲーム」は、的を射るための銃と的を立てる筐体で構成される（図4）。銃の中に赤外

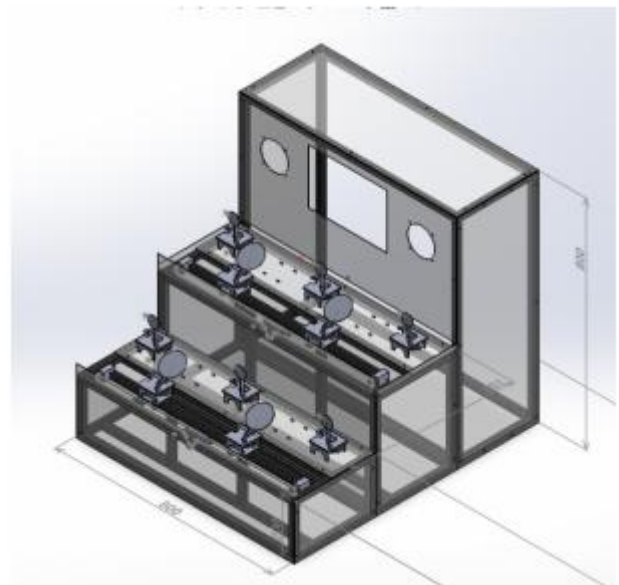


図4 「シューティングゲーム」のフレーム構造

線LEDを設置し、照射される赤外線レーザーが的に中心に設置されたセンサーを反応させた場合に的が倒れるシステムとなっている。銃からの赤外線レーザーは、1回トリガーを引くと0.11sec間だけ照射される。銃内に組み込んだ自作のワンショット回路を図5に示す。回路は的に受光部に合わせて38kHzで発振する。レーザーに反応した的の倒れと起き上がりには、ソレノイ

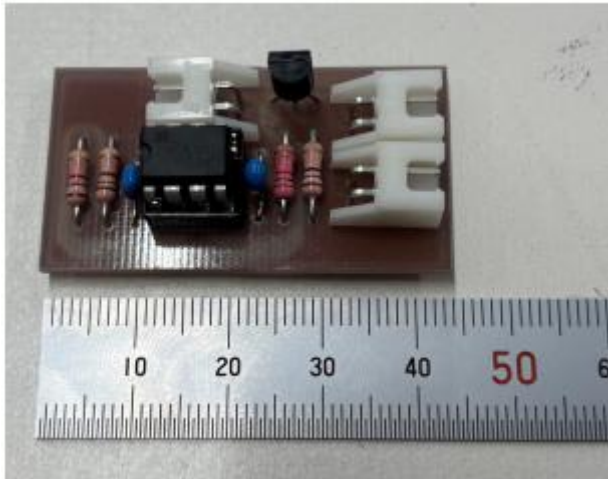


図5 銃に組み込まれるワンショット回路

ドの直線運動をリンク機構によって倒れ/起き上がり運動に変換した。また、コンベア上に固定された的は、ゲーム中にモータ駆動により左右に移動することができる。

2. 2. 3 製作結果

ゲーム中の的にコンベアを使った左右方向の動きを取り入れることができ、ゲームの難易度を変化させることができた。赤外線レーザーの発光のために自作回路を設計・製作し、センサーにレーザーを感知させることができた。銃、的の両方の技術的課題をクリアし、目標とした「遊べるシューティングゲーム」を達成できた。一方で、ゲームの難易度を変化させるための複雑な動きを追加できなかったという反省も挙げられた。

2. 3. 「レーザーパズル」

2. 3. 1 コンセプト

「子どもから大人まで（何歳でも）」、「一人でも多人数でも（何人でも）」楽しめるゲームをコンセプトに「レーザーパズル」の製作に取り組んだ。説明用パネルを図6に示す。

「レーザーパズル」は、スタート位置から出るレーザーの光を設定されたゴールに導くゲームである。レーザーの発光ユニット（スタート位置）と受光ユニット（ゴール位置）は、それぞれ2か所設けられ複数人での対戦も可能となる。レーザー光は、鏡を挿入した透明樹脂のブロックの位置と向きを変えることで様々な方向に曲げて受光部へ導かれる。プレイヤーは、ブロックをどこに置くか、どの向きで配置させるかを考えながら遊ぶことになる。ゲームの難易度は、レーザー光を途中で遮断する“遮蔽板”を盤面に出現させる



図6 「レーザーパズル」説明用パネル

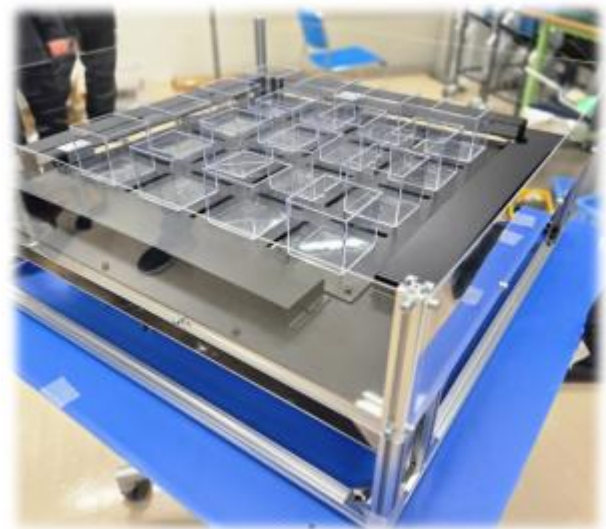


図7 「レーザーパズル」の全景

ことで変化させることができる。図7に「レーザーパズル」の全体像を示す。

2. 3. 2 構造

レーザーの発光ユニット（スタート）と受光ユニット（ゴール）は、ラックピニオン上に設置し、ステッピングモータにより移動する。スタートとゴールの場所は、ゲーム開始時に任意の位置に移動することができる。また、ゲームの難易度を変化させる遮蔽板は、サーボモータとクランク機構により上下させる。滑らかに動作させるために関節部分には、マイクロベアリングを組み込んでいる（図8）。

2. 3. 3 製作結果

設計したゲーム筐体の全体構造を完成させることができた。レーザーの発光部の位置と角度を調整し、最

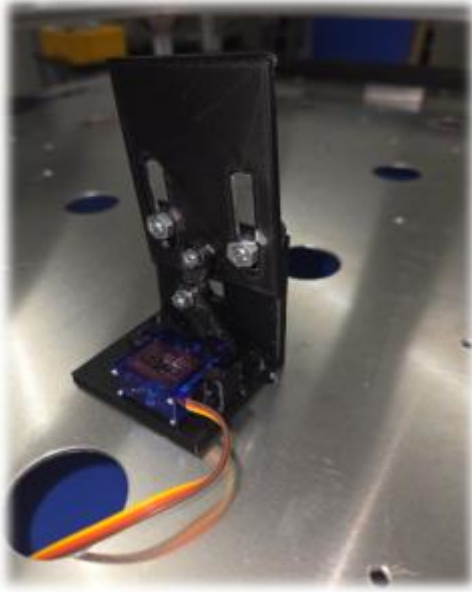


図8 “遮蔽板”ユニット

適な受光条件が達成できるジグを作製することができた。滑らかな動作が可能な遮蔽板ユニットを作製することができた。ただし、ラックピニオン上の発光/受光ユニットを最適な位置へ移動させる動作が達成できなかったという反省が挙げられた。

2. 4 「対戦型ピンポンゲーム」

2. 4. 1 コンセプト

「対戦型ピンポンゲーム」は、「シンプルなルールにして誰にでも楽しんでもらえる作品」をコンセプトに「ものづくりに対してより多くの人に興味を持ってもらいたい」を目標として製作に取り組んだ。また、「対戦型」ゲームとすることでよりゲームを楽しんでもらいたいという思いを込めた作品を目指した。説明用パネルを図9に示す。

「対戦型ピンポンゲーム」は、最大4人で遊べる対戦ゲームとなっている（図10）。盤面上では、鉄球が移動する。鉄球は物理的なラケット（or バー）で打ち返されるわけではなく、LEDの光で表現されたバーで打ち返すよう制御されている。ゲームの難易度は、LEDバーの長さで調整することができる。ゲームでは、ライフポイントがなくなったプレイヤーから脱落し、最後まで残ったプレイヤーが1位となる対戦が楽しめるようにルールを設定している。

ゲーム中は、鉄球を打ち返すときや失敗したときに効果音を鳴らすことができる。

2. 4. 2 構造



図9 「対戦型ピンポンゲーム」説明用パネル



図10 「対戦型ピンポンゲーム」の機能紹介

「対戦型ピンポンゲーム」は、中央の鉄球が動く盤面の4つの辺に、それぞれ鉄球を打ち返すLEDバー（ラケット）が設けられている。その外側には、LEDバーを移動させるスイッチとライフを表示するランプが設置されている。これで4人までピンポンゲームを楽しむことができる。また、対角線上には、ゲームのスタート・ストップスイッチと効果音を出すスピーカーが設置されている。

盤面上の鉄球は、盤面となるアクリル板下に設置されたネオジウム磁石を移動させることで、その磁力によって移動する。鉄球を移動させる磁石は、ステッピングモータを駆動源とし、リニアシャフトとリニアガイドを組み合わせたX-Yテーブル上に取り付け滑らかに直動する機構で移動させる（図11）。鉄球を打ち返

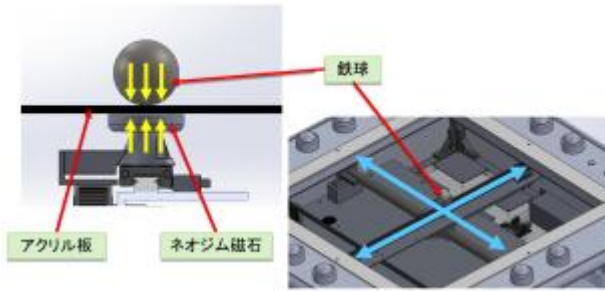


図 11 ネオジウム磁石による鉄球の移動機構

すLEDバーは、鉄球が当たる位置で打返される角度が変化するように制御されている。

2. 4. 3 製作結果

盤面上を滑らかに動くように鉄球を制御する機構の設計と製作に苦勞した。広い領域を X-Y テーブルが移動するため上板との干渉があり、フレームの高さ位置や X-Y テーブル自体の高さの変更が求められた。このチームは、設計の重要性を実体験することができる課題にチャレンジした。

2. 5 「脳トレーション！」

2. 5. 1 コンセプト

「脳トレーション！」は、「わかりやすいルールで誰にでも遊んでもらえる」ゲームであること、加えて「暗所でもきれいなイルミネーション装置」であることをコンセプトにして制作に取り組んだ。2024 年度の作品の中では、ゲームとイルミネーション装置の 2 つの機能を持たせた意欲的な作品である。説明用パネルを図 12 に示す。

「脳トレーション！」は、記憶力と瞬発力を問う 2 種類のゲームを楽しむことができる。記憶力ゲームは、筐体上部から出現する LED ランプが出てくる順番と色を記憶し、対応した色のボタンを出てきた順に押し、記憶力を試すゲームである。瞬発力ゲームは、出てきた LED ランプと同じ色のボタンを制限時間内に押す反応の速さを試すゲームである。さらに、「脳トレーション！」の筐体には、ゲームとして動作する LED ランプをはじめ、押しボタン、筐体側面に様々な色を発光する LED が配されている。この LED の発光によってゲームをプレイしなくても楽しめる外観となっており、暗所でもきれいなイルミネーション措置となっている（図 13）。

2. 5. 2 構造

「脳トレーション！」は、ゲームの開始、ゲームモ



図 12 「脳トレーション！」説明用パネル



図 13 「脳トレーション！」の全景とイルミネーション効果

ードの選択を筐体正面のタッチパネルで行う。ゲーム中に筐体上部から出現する LED ランプは、3D プリンタで成形した半透明の中空球体内部に LED を設置する構造となっている。半透明の球体内部で発光する LED の光は、幻想的な雰囲気を醸し出す。また、筐体側面板には、アクリル板を採用し、テープ LED による光の演出を可能とした。

LED ランプを上下させる機構には、ラックピニオンとモータの組み合わせを採用した。この上下機構には、スライドレールを組み込み、滑らかな上下運動が可能となる。さらに、この機構では、細やかな昇降速度を調整することが可能で、かつ上昇量など複雑な動きを

作りやすい (図 14)。

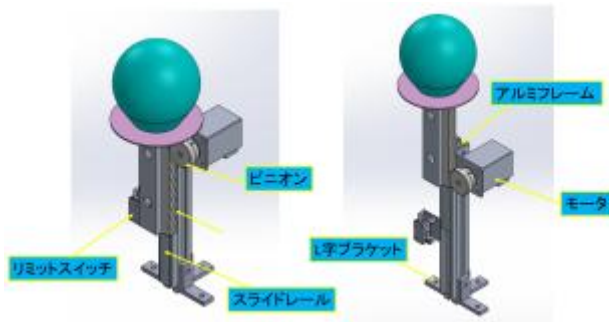


図 14 LED ランプの上下運動機構

2. 5. 3 製作結果

筐体の製作から LED を活用したイルミネーションの外観を完成させることができた。イルミネーション装置としての LED ライトの昇降ユニットを組み込むこともできている。これらの LED ライトユニットの動作とゲームを制御するプログラムの作成に遅れがある。タッチパネル、ボタン、PLC の連携について継続的に調整を行っているチームである。

「脳トレーション！」は、2025 年 10 月に開催された「第 20 回信州大芝高原イルミネーションフェスティバル 2025 (主催：信州大芝高原イルミネーションフェスティバル実行委員会)」に出展し、「脳トレーション！」のイルミネーションを多くの人に楽しんでもらうことができた。

3. おわりに

2024 年度の「総合課題」では、学生のアイデアや構想を完璧に実現できたチームは少なかった。これは、学生の持つ技能・技術がアイデア・構想を実現するレベルに追いついていないことに起因する。その結果、機能を縮小して完成としたチームが多かった。

成果発表では、複数のチームで機械システム学科と電気システム学科とのコミュニケーション不足が反省点として挙げられた。部品の調達ミスや機械・電気設計ミス、スケジュール遅れは、コミュニケーションを十分にとれば防げるミスであることに気づきを得られたことは学生にとって大きな成果である。これからの社会人生活に活かして、それぞれのフィールドで活躍すること期待する。

参 考 文 献

- 1) 中島一雄：専門課程 1 年生の総合課題；長野県南信工科短期大学校紀要,1,19-22(2017)
- 2) 蟹江和彦, 横道正和：DC モーターを用いたホパークラフトの製作；長野県南信工科短期大学校紀要,1,23-26(2017)
- 3) 中島一雄：ゲーム台『いとおかし』の製作；長野県南信工科短期大学校紀要,1,27-29(2017)
- 4) 矢崎美彦：重錘式振り子時計の製作；長野県南信工科短期大学校紀要,1,30-32(2017)
- 5) 千葉隆史：総合課題「無限ドミノ」製作の指導について；長野県南信工科短期大学校紀要,1,33-36(2017)
- 6) 横道正和：Active Trash Box の開発；長野県南信工科短期大学校紀要,1,37-40(2017)
- 7) 宮下利仁：課題製作「バブルミネーション」の紹介；長野県南信工科短期大学校紀要,1,41-44(2017)
- 8) 湯本一彦：機械装置『KARAKURI』の製作；長野県南信工科短期大学校紀要,1,45-47(2017)
- 9) 横道正和, 中島一雄, 湯本一彦, 大工原裕之：平成 29 年度総合課題の取り組み；長野県南信工科短期大学校紀要,2,16-20(2018)
- 10) 千葉隆史：総合課題「草むしりロボット」の紹介；長野県南信工科短期大学校紀要,2,21-23(2018)
- 11) 宮下利仁：総合課題「電動アシスト車いす」の紹介；長野県南信工科短期大学校紀要,2,24-25(2018)
- 12) 三沢雅芳, 柳沢裕二：総合課題「M-POV」の製作；長野県南信工科短期大学校紀要,2,26-28(2018)
- 13) 矢崎美彦：2018Ene-1GP SUZUKA KV-BIKE チャレンジへの参加；長野県南信工科短期大学校紀要,2,49-51(2018)
- 14) 三沢雅芳, 鮎沢俊輔：自動ホワイトボード消し装置の製作；長野県南信工科短期大学校紀要,3,13-16(2019)
- 15) 矢崎美彦, 松原洋一, 柳沢裕二：2021 年度総合課題の取り組み；長野県南信工科短期大学校紀要,6,9-14(2022)
- 16) 柳沢裕二：2022 年度総合課題の取り組み；長野県南信工科短期大学校紀要,7,25-29(2023)

研究・教育・社会活動の概要

(2024.4.1～2025.3.31)

A. 研究活動

1. 研究論文・解説・技術資料等

K. Okamoto and K. Morishige

C-Space-Based Toolpath Generation for Five-Axis Controlled Machining with Special Tools

Int. J. Automation Technol., Vol.18 No.5, pp. 679-687, 2024.

松原洋一

ハイブリッドロケット地上支援設備の開発

長野県南信工科短期大学校紀要, 8, 2-7, 2024.

岡本 謙, 森重功一

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

長野県南信工科短期大学校紀要, 8, pp.8-13, 2024.

武田三男, 北原英明

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)

長野県南信工科短期大学校紀要, 8, 14-26, 2024.

栗田秀實, 倉澤勝美, 宮島 俊, 武田三男

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

長野県南信工科短期大学校紀要, 8, 27-37, 2024.

鮎沢俊輔

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―

長野県南信工科短期大学校紀要, 8, 38-39, 2024.

武田三男

職業能力開発短期短期大学校と編入学制度

長野県南信工科短期大学校紀要, 8, 40-49, 2024.

柳沢裕二

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

長野県南信工科短期大学校紀要, 8, 50-53, 2024.

鮎沢俊輔

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―

長野県南信工科短期大学校紀要, 8, 54, 2024.

2. 学会発表

熊川千寛, 岡本 謙, 森重功一

バレル工具に対応した5軸制御加工経路補間手法の開発
型技術者会議, 2024.

熊川千寛, 岡本 謙, 森重功一

曲線切れ刃を持つ異形工具に対応した5軸制御加工経路補間手法の開発
日本機械学会生産加工・工作機械部門講演会, 2024.

小野樹生, 岡本 謙, 永松秀朗, 森重功一

工具軸の変化による加工誤差を考慮した5軸制御スワープ加工のための工具経路補間手法に関する研究
精密工学会秋季大会, 2024.

森重功一, 岡本 謙, 石原秀彬, 内野源太

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
第20回国際工作機械技術者会議(IMEC2024), 2024.

3. 特許・発明

森重功一, 岡本 謙, 山田大河

出願中「工具経路生成装置, 工具経路生成方法, 及びプログラム」

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

デジタルモールド粉末冶金に関する研究
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

松原洋一

金属シーム溶接痕の自動検査に最適化した検査技術の研究

オプトウエア株式会社

5. 表彰等

岡本 謙

田中榮賞（第 205 号），電気通信大学通機会，2025.3

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），ならびに戸田欣也氏（JAICA）に専門分野の講義を担当していただいた。

工藤賢一

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。

小林義和

制御工学概論，力学演習，基礎製図，ゼミナール，総合課題，応用数学，機械工学概論

荒川 進

安全衛生工学，機械工学Ⅱ，油圧・空圧制御，機械加工実習Ⅰ，制御工学実習Ⅱ，設計製図実習Ⅲ，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，設計製図実習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

湯本一彦

熱力学，機械工学Ⅰ，数値制御Ⅰ，機械工学基礎実験Ⅱ，機械加工実習Ⅱ，制御工学実習Ⅱ，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，制御工学実習Ⅱ，測定工学実習，設計製図実習Ⅱ，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

制御工学概論，基礎製図，数値制御Ⅱ，機械工学基礎実験Ⅰ，情報処理実習，安全衛生作業法，機械加工実習Ⅰ・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

鈴木皓司

機械材料，機械加工学Ⅱ，制御工学概論，材料，機械工学概論

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，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，制御工学演習，機械工作実習，電気機器，機械電気製図，機械制御Ⅱ，環境システム技術，FA システム構築実習Ⅱ，電気機器実験，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
小平英治	力学
小林真美	工業数学
五味久幸	製図, 材料力学
佐藤 学	機械電気製図
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, 情報通信工学基礎実習
藤崎淳子	設計製図実習 II
藤原勝幸	線形代数学
藤原政治	機械加工実習 I, 測定工学, 機械加工実習
末松英司	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
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

青木聖弥	羽ばたきロボットの開発	鮎沢俊輔 (機械システム学科)
岩田康佑	自然言語で音声コミュニケーション可能な生成 AI に基づいたロボットの開発	岡本 謙 (機械システム学科)

漆戸陽規	3D パズル製作における形状データ作成アルゴリズムの改良	小林義和 (機械システム学科)
大槻 隼	生成 AI を利用したあいまいな自然言語で指令可能なロボットの開発	岡本 謙 (機械システム学科)
木下滉也	レアメタルの切削切屑を再利用した装飾品材料の開発～焼結条件に関する研究～	中島一雄 (機械システム学科)
久保田隼人	水田の土壌攪拌のための機構の提案と評価	荒川 進 (機械システム学科)
駒澤聖也	マイクロマシニングによる鱗形状の製作	小林義和 (機械システム学科)
洲原 瞬	デジタルモールド粉末冶金における合金生成焼結適正条件の開発	中島一雄 (機械システム学科)
土屋洋貴	レアメタルの切削切屑を再利用した装飾品材料の開発～材料形態に関する研究～	湯本一彦 (機械システム学科)
中谷駿佑	協働ロボットと NC 工作機械の連携による自動化システム構築に関する教材の検討	湯本一彦 (機械システム学科)
中村璃空	マグネット駆動によるダブルアクティングスターリングクーラーの開発	中島一雄 (機械システム学科)
長谷部遥希	リン酸二水素アンモニウム結晶育成装置の開発	鮎沢俊輔 (機械システム学科)
前澤陽斗	DfAM (Design for Additive Manufacturing)を用いた造形物の機械特性の調査	小林義和 (機械システム学科)
水上敦之	卓上 CNC 工作機械を用いた彫刻加工システムの開発～写真画像を用いた工具経路生成～	岡本 謙 (機械システム学科)
宮坂陸空	協働ロボットを活用した生産ライン構築に関する教材の検討	湯本一彦 (機械システム学科)
宮澤諒伍	移動式ロボットの活用に向けた研究	鮎沢俊輔 (機械システム学科)
森田雄陽	デジタルモールド粉末冶金の材料の開発～金属粉末へのめっき技術～	中島一雄 (機械システム学科)
八木雅也	筋電位測定システムの無線化と手動作時の筋電位の取得	荒川 進 (機械システム学科)
池上航基	既存の筋電位測定用アンプの複製と改良	南澤壯和 (電気システム学科)
伊藤拓斗	高周波センシングデバイスの開発とその応用	工藤賢一 (電気システム学科)
伊藤晴希	TWELITE を用いたデータ表示・保存 IoT システムの開発	倉澤勝美 (電気システム学科)
伊藤由太	画像・テキストファイル対応マトリックス LED 点灯プログラムの開発	倉澤勝美 (電気システム学科)
大藏孝明	IoT による PLC データの自動収集・Excel 可視化プログラムの開発	柳沢裕二 (電気システム学科)
加藤悠晟	スイッチング電源回路に関する実習の開発	倉澤勝美 (電気システム学科)
木下 想	アスパラガス収穫機を夜間運用するためのコード識別	松原洋一 (電気システム学科)

についての研究

梶島龍基	BLEBeacon を用いた人物の検索システムの開発	柳沢裕二（電気システム学科）
竹澤 名	AI を用いた画像認識による製品の仕分けについての研究	木下昌信（電気システム学科）
舘野太輝	マトリックスセンサを用いた物体位置検出についての研究	松原洋一（電気システム学科）
永原颯人	IoT デバイス向け Wi-Fi エネルギーハーベスティングにおけるレクテナの開発	工藤賢一（電気システム学科）
古畑聖也	マイコン上で動作する軽量な SVM を用いた手の状態判別に関する研究	南澤壯和（電気システム学科）
堀内そら	力覚センサを使用したロボットのワーク把持についての研究	木下昌信（電気システム学科）
宮下 歩	顔認証を用いた出席管理システムの確立	柳沢裕二（電気システム学科）
山中桜太郎	AI 物体検出と画像処理を用いた車の速度測定の研究	松原洋一（電気システム学科）
吉澤優真	直感的な操作を目指したグローブ型マウスの開発	南澤壯和（電気システム学科）
北澤治宜	6 軸垂直多関節ロボットを活用した組立てシステムの構築	木下昌信（電気システム学科）
牧内蒼空	筋電位を使用したオーディオコントローラ	南澤壯和（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。

湯本一彦

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 野口光歩

ロボットアイデア甲子園甲信越大会出場

2024.10.19

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

総務省・戦略的情報通信研究開発推進事業 評価委員

2017.4 - 2025.3

武田三男

信州大学 特任教授

2016.4 - 2025.3

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 - 2025.3

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 委員長

2024.4 - 2025.3

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 - 2025.3

工藤賢一

長野県駒ヶ根工業高等学校 評議員

2024.4 - 2025.3

工藤賢一

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

2024.4 - 2024.5

工藤賢一

駒ヶ根市雇用対策協議会 委員

2024.4 - 2025.3

工藤賢一

上伊那総合技術新校再編実施計画懇話会 構成員

2024.4 – 2025.3

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

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「商工業者向け SDGs 推進プロジェクト」

「IoT ツール実習研修」

2024.11.19 – 12.3, 長野県南信工科短期大学校 (南箕輪村)

倉澤勝美, 柳沢裕二, 岡本 謙

伊那市中学生キャリアフェス実行委員会

「伊那市中学生キャリアフェス 2024」

2024.11.21, エレコム・ロジテックアリーナ (伊那市)

柳沢裕二, 工藤賢一

東伊那公民館講座

「ドローンプログラミング実習」

2024.8.5 – 8.6 東伊那小学校体育館 (駒ヶ根市)

柳沢裕二, 工藤賢一

宮田村公民館講座

「ドローンプログラミング講座」

2024.8.7, 長野県南信工科短期大学校 (南箕輪村)

柳沢裕二

上伊那地方視聴覚教育協議会 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」

2024.9.3, 長野県南信工科短期大学校 (南箕輪村)

柳沢裕二

南箕輪村立南部小学校

「ドローンプログラミング講座」

2025.1.16 - 20, 南箕輪村立南部小学校 (南箕輪村)

柳沢裕二

技能検定 シーケンス制御検定員

2025.1.11 - 12, 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

2025.2.7 - 9, 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

ながの産業支援ネット

3) 研究・教育相談

松原洋一

プレス部品の AI 画像検査についての技術相談

2024.8

株式会社サンコー

松原洋一, 倉澤勝美

Co2 排出量可視化システムの実証実験についての相談

2025.2

株式会社サーリューション

松原洋一

水位センサの開発についての技術相談

2025.2

株式会社 Lagopus

岡本 謙

生成 AI の産業利用に係わる技術相談

2024.4

ルビコンエンジニアリング株式会社

岡本 謙

技能検定機械加工 (数値制御旋盤作業) に係わる技術相談

2024.4 – 2024.7

長野県工業技術総合センター

D. 研究助成

小林義和

3D プリント造形物の内部設計

公益財団法人 TAKEUCHI 育英奨学会助成金

250 万円

小林義和

鱗形状のマイクロマシニングのための加工機開発

令和6年度南信工科短大振興会研究補助金

20 万円

荒川 進

生体信号に基づく測定具のユーザビリティの評価

令和6年度南信工科短大振興会研究補助金

20 万円

中島一雄

デジタルモールド粉末冶金に関する研究

令和6年度南信工科短大振興会研究補助金

20 万円

岡本 謙

特殊工具を用いた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

令和6年度南信工科短大振興会研究補助金

20 万円

編 集 後 記

多くの皆様のご尽力によりまして、南信工科短期大学校紀要第9号を発刊することができました。本校は開校以来、地域産業を支える人材育成を使命とし、教育・研究・地域貢献の三本柱を掲げて歩んでまいりました。そして本年、開校10周年という大きな節目を迎えることができましたことは、ひとえに関係各位の温かいご支援とご協力の賜物であり、心より感謝申し上げます。

創刊以来、紀要は本校の教職員による研究成果や教育実践、さらには地域との連携活動を広く発信する場として機能してきました。特に本校の特色である「総合課題」や「卒業研究」に関する報告は、学生の主体的な学びと成長を示す貴重な記録であり、地域社会との協働の証でもあります。今回の第9号においても、こうした取り組みを紹介し、本校の歩みと未来への展望を感じ取っていただける内容となっております。

最後に、本号の編集にあたりご協力いただいた執筆者の皆様、ならびに関係者の皆様に深く感謝申し上げます。今後とも南信工科短期大学校紀要をご愛読いただきますようお願い申し上げます。

紀要委員会 主任 工藤 賢一

2025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9号 2025

令和8年2月26日 印刷

令和8年2月27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
