

令和 4 年 6 月 29 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H04411

研究課題名(和文) 質感と力学特性に着目した傾斜機能プラスチックの開発

研究課題名(英文) Development of Inclined Functional Plastics Focusing on Texture and Mechanical Properties

研究代表者

寺内 文雄 (Terauchi, Fumio)

千葉大学・デザイン・リサーチ・インスティテュート・教授

研究者番号：30261887

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、熱可塑性樹脂と熱硬化性樹脂を対象として、質感や硬さが連続的に変化する傾斜機能を有するプラスチックを開発することを目的とした。熱可塑性樹脂の場合は、二軸押出機と2種類の樹脂を用いて、力学特性が連続的に変化する3Dプリンタ用フィラメントを作製した。その後、作製したフィラメントを用いて3Dプリンタで造形することで、連続的に力学特性が変化する立体を造形することができた。一方、熱硬化性樹脂を対象とした場合は、シリコンゴムの硬化時にシンナーを加えることで、硬さが傾斜的に変化する立体物を作製できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では3Dプリンタ用フィラメントの特性を連続的に変化させる方法やシリコンゴムにシンナーを加えるなどの方法によって、質感や色、硬さなどの力学的な特性が傾斜的に変化するような立体を作製するための具体的な方法を提案した。これにより、質感や力学的特性を意図的、かつ連続的に変化させられることから、従来のような均一な材料でできていた製品とは機能や使い勝手が大きく異なる製品を提案することができる。

研究成果の概要(英文)：In this study, it was aimed to develop plastics with a gradation function that continuously changes in texture and hardness for thermoplastic and thermosetting resins. In the case of thermoplastic resin, a twin-screw extruder and two types of resin were used to produce a 3D printer filament with continuously varying mechanical properties. We then confirmed that the filaments and the 3D printer could be used to fabricate three-dimensional objects with continuously changing mechanical properties. On the other hand, in the case of thermosetting resin, it was found that by adding thinner during the curing of silicone rubber, it was possible to fabricate three-dimensional objects whose texture and hardness changes in a gradational manner.

研究分野：デザイン材料

キーワード：傾斜機能材料 樹脂 熱硬化性樹脂 熱可塑性樹脂 硬さ 質感

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

研究開始当初に取り組んでいた研究課題では、熱可塑性樹脂に様々なフィラーを混練、成形したサンプルを対象に、その質感の印象変化について検討していた<sup>1)</sup>。またこの課題と並行して、3Dプリンタを用いて障害者用補助具の試作を行っていた。この際、種類ごとに異なるフィラメントを使っている限り3Dプリンタを用いた造形には限界があるのではないかと考えるに至った。3Dプリンタのなかには複数のプリントヘッドを有しているものもあり、複数の樹脂を組み合わせていることができる。しかしながらフィラメントが樹脂ごとに分かれている以上、連続的に樹脂の特性を変化させることは難しい。もしプラスチックの特性を連続的に変化させることができれば、プラスチックの活用可能性がさらに大きく広がるのではないかと考えた。

### 2. 研究の目的

現状のプラスチック製品の多くが単一の色相やテクスチャ、力学特性によって構成されている点に着目し、色相やテクスチャ、やわらかさをはじめとする力学特性が連続的に変化するような質感・機能傾斜プラスチックを開発することを目的とした。まず熱可塑性樹脂を対象として、樹脂の種類を変えることで、色相やテクスチャ、力学特性などを連続的に変化させることを試みた。検討対象とする方法は、押出成型による3Dプリンタ用フィラメントの作製とそれを用いた3Dプリンタによる造形の2つである。そこで機能が連続的に変化するフィラメントを作製することとした。ついで、作製したフィラメントと3Dプリンタを用いて、色相やテクスチャ、力学特性などが連続的に変化するような立体物を造形することを次の目的とした。最後に熱硬化性樹脂の一つであるシリコンゴムを対象として、同様に質感や力学特性が連続的に変化するゴム作製方法の開発を試みた。

### 3. 研究の方法

#### (1) FDM方式3Dプリンタのための傾斜機能フィラメントの作製とその成形

2種類の硬さが異なる樹脂、ポリプロピレンとオレフィン系エラストマーのペレットを用い、その配合割合を徐々に変えながら混練することで、力学特性が連続的に変化する（傾斜機能を有する）フィラメントの作製方法を開発するとともに、作製したフィラメントを用いた成形方法を確立することを試みた。

#### ① フィラメントの作製方法

ペレットにはポリプロピレン（Prime Polypro 社製 J105G）とエラストマー（三井化学社製ミラストマ 6030NS）を用いた。ペレットの混練とフィラメントの作製には、二軸押出機（東洋精機製作所製ラボプラストミル）に直径1.75mmの円形ダイスを取り付けたものを使用した。傾斜機能を有するフィラメントを開発するうえで課題となるのが、高い精度で一定の直径（1.75mm）を有するフィラメントを作製することである。そのため二軸押出機から押し出されるフィラメントを保持しつつ、冷却しながら一定の速度で巻き取る必要がある。そこで図1に示すような冷却ファンとNoztek社製フィラメントワインダーを備えた治具を作製した。これを用いることで、やわらかさの異なる性質を持たせつつ、高い精度で一定の直径を有するフィラメントを作製できることが確認できた。図2は作製したフィラメントで、わかりやすいようにやわらかさの変化に伴って色相を変化させてある。

#### ② 傾斜機能を有するフィラメントを用いた3Dプリンタによる成形

ポリプロピレンのみのフィラメントおよびポリプロピレンとエラストマーを1:1の配合割合でした場合は3Dプリンタ（Raise 3D社製 Raise Pro2）によって吐出できた。しかしながら、エラストマーのみを用いて作製したフィラメントでは吐出することができなかった。その原因がやわらかいフィラメントを送り出すための機構にあると考え、装置の改良を行った。具体的な改良点は2つである。まず図3に示すように、純正新型ノズル（ヒーター直径0.4mm）をノズル

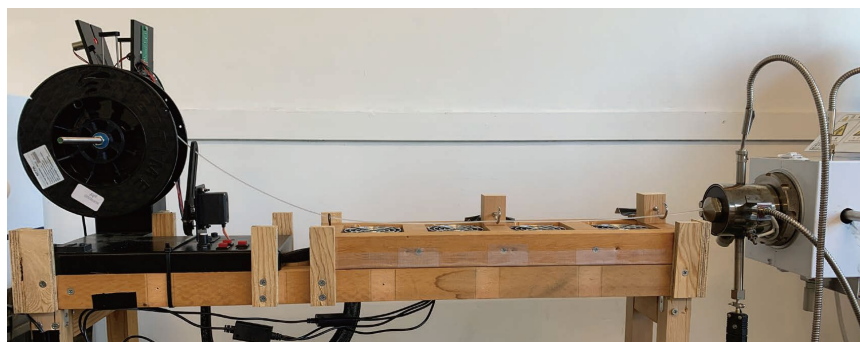


図1 制作したフィラメント冷却とフィラメント巻取り治具

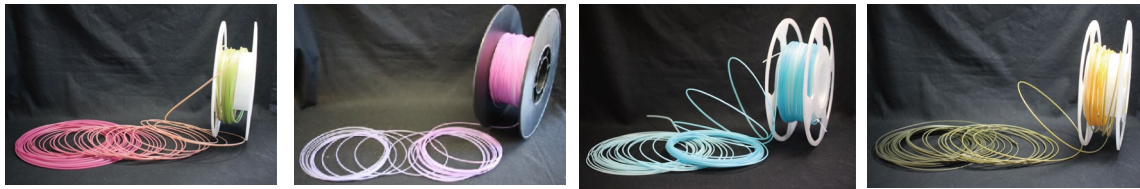


図2 作製したやわらかさと色相が連続的に変化する傾斜機能フィラメント

内部がテフロン加工されていてフィラメントが詰まりにくいPTFEノズル（ヒーター直径0.5mm）に変更した。ついでフィラメントの摩擦抵抗を減らして送ることができるように、首振りフィラメントスタンドを用いた治具を作製した（図4）。これにより、フィラメントスプールが常にノズルの方向を向き、より小さな力で抵抗なくフィラメントを送り出すことができるようになった。

ついで、3Dプリンタによって、吐出可能なエラストマーの配合割合について検討を行った。その結果、ポリプロピレン：エラストマー＝2：8までの配合割合であれば、3Dプリンタによって造形できることが確認できた。

### ③ 作製した試験片の片持ち梁曲げ試験

図5に作製した3種類の試験片を示す。試験片は平板状とし、大きさはいずれも4×25×100mmである。それぞれの試験片は以下のような構成となっている。

サンプルA：ポリプロピレンのみで作製した試験片。サンプルB：試験片の中央で異なる樹脂となっており、図の下側はポリプロピレンのみで、図の上側はエラストマー80%：ポリプロピレン20%とした試験片。

サンプルC：ポリプロピレンとエラストマーの配合割合が連続的に変化するフィラメントを用い、図の下から上へと連続的にエラストマーの割合が増加する試験片。

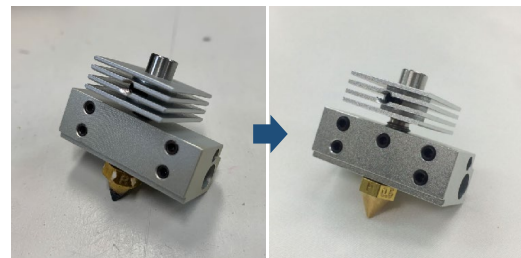
成形した試験片の力学特性の変化を確認するために片持ち梁曲げ試験を実施した。試験には小型卓上試験機（島津製作所製EZ-S）を用い、試験速度は毎分20mmとした。

### (2) シリコンゴムを用いたやわらかさが連続的に変化するゴムの成形

常温硬化型シリコンゴムに専用の希釈材を添加するとゴムが柔らかくなることが知られている。そこでこの性質を利用してやわらかさが連続的に変化するゴムの成形方法を開発することを試みた。希釈材を用いることで、1種類のシリコンゴムによって様々なやわらかさのゴムを作製することができる。この特性を利用して、連続的にやわらかさが変化するゴムの成形を試みた。

### ① 連続的にやわらかさが変化するシリコンゴムの成形方法

シリコンゴムは接着が困難という特性がある。そのため、やわらかさの異なるゴムを一体化する方法について検討した。シリコンゴムには信越シリコン社製KE-12を、希釈材にはRTVシンナー、以下シンナー（信越シリコン社製）を用いた。やわらかさが異なるゴムを一



純正ノズル PTFE ノズル  
図3 変更した3Dプリンタのノズル

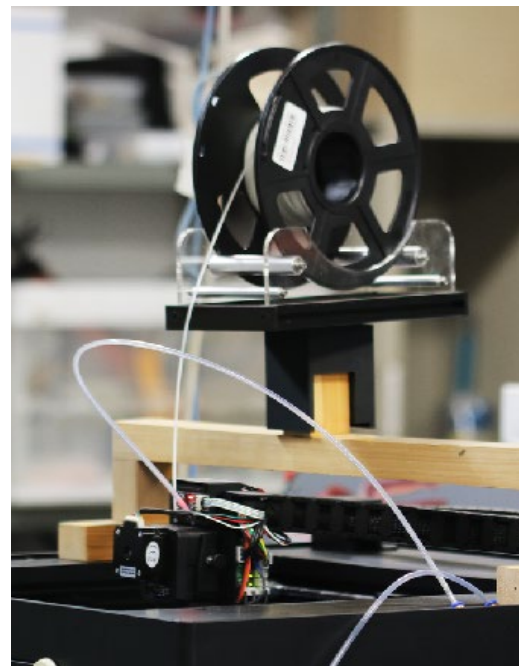


図4 首振りフィラメントスタンドと制作した治具

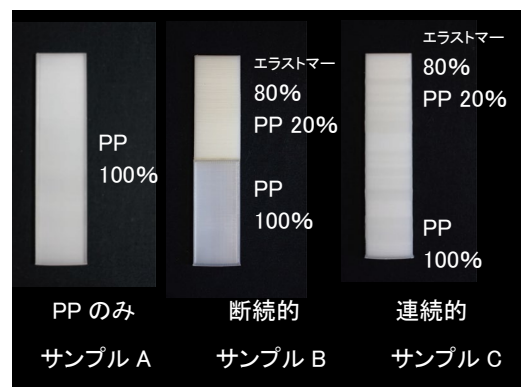
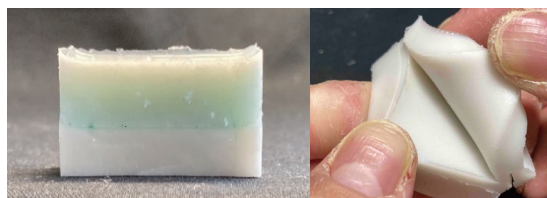


図5 作製した曲げ試験用試験片

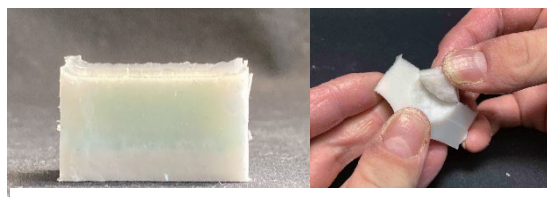
体させるために、攪拌時の粘度と硬化時間に着目した。図7は、作製した2種類のゴムサンプルで、いずれもシンナーを添加することでやわらかさを変化させた2種類のゴムからなっている。図6a)は、1層目のゴムが硬化してから2層目を流し入れたもので、図6b)は1層目のゴムが十分硬化する前に2層目を流し入れたものである。よりやわらかい方のゴムには着色してあるが、図からもこれらの境界面の違いは明らかである。図6a右側に示すように、硬化後に2層目を流し入れたサンプルでは2層の境界面で剥がれてしまうのに対し、完全に硬化する前に2層目を流し入れることで、2種類のゴムが一体化することが確認できた(図6b右側)。

#### ① 経時変化に伴う収縮への対応策

シリコンゴムに添加するシンナーの添加量が多いほど、そして層間のシンナー添加量の差が大きいくほど経時変化に伴って、ゴムが収縮する現象がみられた。そこで積層数を増やしてシンナー添加量の差を減らすことで経時変化に伴うゴムの収縮に対応することとした。図7右側に示すゴムは、図7左側に示すように5種類の硬さからなるゴムを一体化させたものである。作製後2週間熱風乾燥機で乾燥させたところ、収縮前後で底面の長さが1.7mm、上面で0.4mm、それぞれ収縮しているものの、あらかじめ収縮量を予測した型を用いて成形を行ったことで、目標とした直方体形状のゴムを作製することができた。

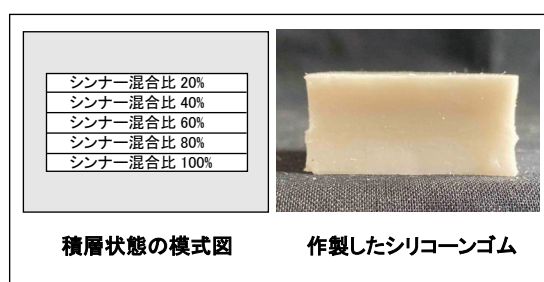


a)1層目硬化後に2層目を流し入れたサンプル



b)1層目硬化前に2層目を流し入れたサンプル

図6 異なるやわらかさのゴムを一体化させる試み



積層状態の模式図

作製したシリコンゴム

図7 5段階のやわらかさが連続的に変化する直方体シリコンゴム

## 4. 研究成果

### (1) 試験片の片持ち梁曲げ試験の結果

図8は作製した試験片に2.5Nの荷重をかけた際の試験片の様子を示している。また図9はその際の荷重-変位曲線である。サンプルAはポリプロピレンのみでできており、最も硬いことから、最も変位が少ない結果となった。サンプルBの場合は、試験片の中央付近で折れ曲がるように変形し、変位18mm付近から荷重は増加せずに変位のみが増加した。これは固定端から試験片の半分までがポリプロピレンのみで、中央から自由端まではエラストマーの配合割合を



図8 片持ち梁曲げ試験の様子

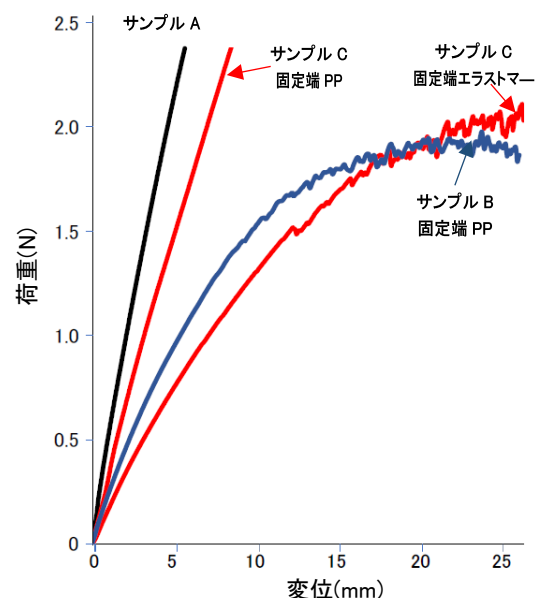


図9 荷重-変位曲線

80%まで高めたものであることに起因している。サンプルCはやわらかさが連続的に変化するため、固定端をポリプロピレン 100%とした場合と固定端をエラストマーの比率を 80%まで増加させた場合の 2つの条件で試験を行った。固定端をポリプロピレン 100%とした場合は、2.5 Nの荷重をかけた際の変位が 7.7mm となり、ポリプロピレンのみで成形したサンプルAよりも変位が大きくなった、一方の固定端をエラストマー80%とした場合は大きく変形し、2.0Nの荷重で約 25 mmまで変位した。以上のように、連続的にやわらかさを変化させることで局所的な変形を起こすことがないこと、変形を制御できる可能性があることが確認できた。

### (2) 連続的にやわらかさが変化する熱可塑性樹脂の活用可能性

図 10 は、ポリプロピレンに対するエラストマーの配合割合を 0~80%まで徐々に増加させたフィラメントを用いて、3Dプリンタによって成形したペグである。エラストマーを配合していない方のペグ端部は、指の力で変形させることができない硬さであるのに対し、エラストマーの配合割合の高いもう一方の端部は容易に変形させることができた。このように色や力学特性を変化させたい箇所が明らかな場合は、予め成形に必要な樹脂量を計算したうえでフィラメントを作製することによって、目的とする力学特性を有する立体を作製することができる。

図 11 はペグの端部を閉じた場合と、端部を閉じていない 2種類のペグの変形の様子を示している。端部を閉じた場合はエラストマーの配合割合を高めても指で変形させることができない硬さとなった。加えて、ペグの内部構造を変えることによって変形の自由度が高まることが確認できる。3Dプリンタを使うことの利点の一つは内部構造を容易に変えられる点にあり、これによりデザインの自由度が大きく向上すると考える。

### (3) 連続的にやわらかさが変化するシリコーンゴムの活用可能性

図 12 は、部分的にやわらかさが異なる 2つのシリコーンゴム製の立方体を圧縮した際の変形の様子を示している。図の上側は上下部分を、図の下側は中央部分を他の部分よりも柔らかくしたものである。図から局所的かつ連続的にやわらかさを変えることによって、圧縮した際の変形を制御できることが確認できた。これまでの実験により、積層数とシンナーの配合割合によるやわらかさの得変化、経時変化に伴う収縮の程度が明らかになっており、設計段階でこれらを考慮することで、目的とする変形をさせることができる。

### (4) 今後の課題

本研究課題では、樹脂の性質を連続的に変化させるための検討を行った。これにより色相や力学特性を連続的に変化させるための具体的方策を示すことができた。しかしながら、フィルターによる連続的な特性変化を確認するには至らなかった。今後は、本研究課題で得られた知見に加え、フィルターの特性を考慮した検討を行うことが必要である。

### <引用文献>

(1) 須田高史, 白柳爛, 沈得正, 佐藤浩一郎, 寺内文雄: フィラーとプラスチックによる複合材料の経時変化に伴う質感変化, デザイン学研究, 67(1), 29-38, 2020

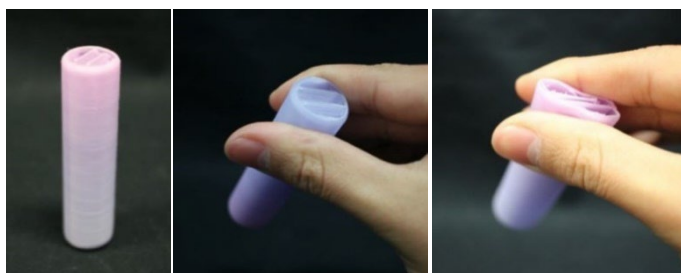


図 10 連続的にやわらかさが変化するペグの変形

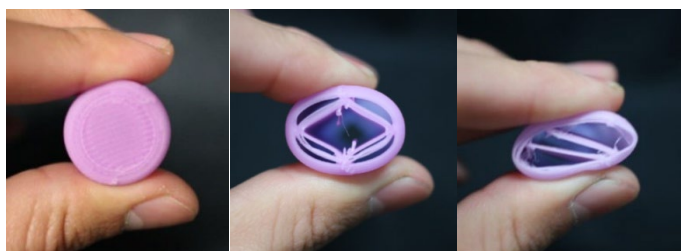


図 11 ペグの端部や内部構造と変形のしやすさの関係



上下のみやわらかくした場合



中央部をやわらかくした場合

図 12 局所的にやわらかさが異なるゴムの変形

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 佐藤浩一郎, 都淳朗, 武藤稜介, 寺内文雄
2. 発表標題 FDM方式 3Dプリンタのための傾斜機能フィラメント作成とその成形
3. 学会等名 デザインシンポジウム2021
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	佐藤 浩一郎  (Sato Koichiro)  (40598330)	千葉大学・デザイン・リサーチ・インスティテュート・准教授   (12501)	
研究分担者	須田 高史  (Suda Takashi)  (50522372)	群馬県立産業技術センター・その他部局等・係長   (82305)	
研究分担者	久保 光徳  (Kubo Mitsunori)  (60214996)	千葉大学・デザイン・リサーチ・インスティテュート・教授   (12501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------