

「プラスチックの代替素材に関する研究 2024」—スキムミルクと酢で作成した固形物の特性について—

静岡大学教育学部附属静岡中学校

3年 堀池哲平

1 動機

現在、ごみが社会的に大きな問題になっている。中でも、投棄されたプラスチックは、完全に分解されず自然界に長い間残り続け、毎年増加し続けている。そして、このプラスチックごみが生態系に悪影響を与えていることから、SDGs：Sustainable Development Goals の解決すべき問題としても取り上げられている。つまり、現在使用しているプラスチックに代わる代替素材が必要である。

そこで私が注目したのが、生分解性プラスチックである。生分解性プラスチックは、タンパク質から作成することができ、微生物によって水と二酸化炭素に分解することができる。この生分解性プラスチックをプラスチックに代わる代替素材として利用できれば、プラスチックごみが自然界に長い間残り続ける量を削減する手段の 1 つになると考えた。そこで私は、生分解性プラスチックの 1 つであるカゼインプラスチックについての研究を 2022 年度より続けている。

2 研究準備 固形物の作成

(1) 準備内容

2023 年度の研究で牛乳と酢で作成した固形物よりもスキムミルクと酢で作成した固形物の方が、より有用な固形物であると判断した。そこでスキムミルクと酢で生成した固形物の他の特性を調査するために新たな固形物を作成した。

(2) 材料

スキムミルク、水 (50~60℃)、酢

(3) 道具

電子はかり、軽量カップ、耐熱ガラス、コーヒーポット、スポイト、漏斗、電子レンジ、クッキングシート、クッキングペーパー、自作成型型 (注 1)

注 1：研究で使用した成型型を図 2 にしめす。成型型は、レゴブロックにて自作した。また、作成した固形物を枠型から取り外し易いように枠型が分離できる構造にすると共に、外す枠の固定と底面を追加し、固形物に対して力を加え易くする工夫をした (図 1)。

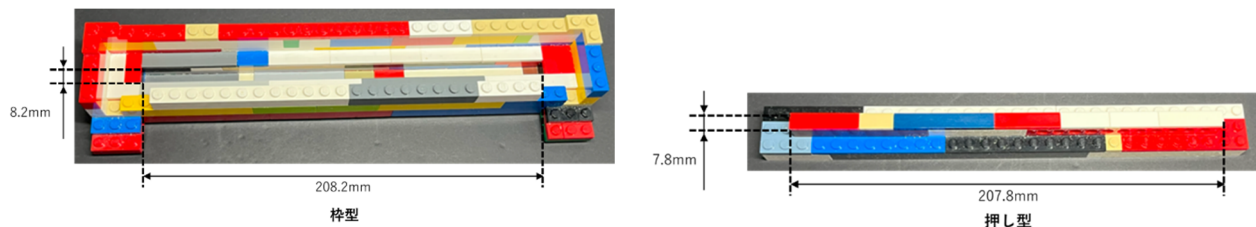


図 1 自作成型型 (レゴブロック)

(4) 固形物の作成方法

ア：スキムミルク 21.4 g に 50~60℃のお湯を注ぎスキムミルクを溶かす。この時、お湯に溶かしたスキムミルクが 200 g となるように調整をする。

イ：お湯に溶かしたスキムミルクを沸騰直前まで加熱し、酢を加えてできた固形物をガーゼによる濾

過で取り出す。

ウ：取り出した固形物を水で洗い流し、キッチンペーパーで水分を取り除く。

エ：自作の成形型を使用して固形物を成形する。

オ：電子レンジ600Wの加熱（3秒間）と加圧を繰り返し、固形物をひとまとめにする（固形物の粒が無くなり一体化する）。

カ：ひとまとめにした固形物を乾燥させる（完成）。

（5）結果

図2に固形物の作成結果をしめす。

作成日	作成結果	作成日	作成結果
2024.03.30		2024.04.30	
2024.04.07		2024.05.01	
2024.04.13		2024.05.11	
2024.04.14		2024.06.09	
2024.04.20		2024.06.22	
2024.04.27		2024.06.23	
2024.04.28		2024.07.14	

図2 固形物の作成結果

（6）考察

固形物の自然乾燥途中に反りが発生することがあり（図3）、乾燥させる途中で成形型に重しを乗せて反りを矯正する必要があったため、乾燥で固形物を変形させない工夫が必要であると判断した。固形物の変形原因は、自然乾燥による水分の揮発が均一にならないことである。そのため、自然乾燥させる前の水分量をできるだけ少なくし、自然乾燥させる時間を短くすることが重要であると考えた。しかし、2023年度の研究によって加熱乾燥の時間を長くすることで、固形物の自然乾燥時間を短縮させると固形物の膨張・破裂や焦げが発生し（図4）、きれいに成形することができないと分かっている。



図3 乾燥途中の固形物



図4 焦げの発生した様子

そこで、スキムミルクと酢を混ぜてできた生成物を一度乾燥させ、その乾燥させた生成物に対して、改めて水分を加える方法を考えた。本方法により固形物の成形に必要な水分量が少なくなるように調整し、自然乾燥に必要な時間を短縮することができると考えた。

3 研究1 固形物作成方法の改善に関する研究

（1）研究概要

上述において、検討したスキムミルクと酢を混ぜてできた生成物を一度乾燥させ、その乾燥させた生成物に対して、改めて水分を加える方法の有用性を調査する。

（2）材料

スキムミルクと酢を混ぜて出来た生成物、水

(3) 道具

すり鉢、すりこぎ、電子はかり、軽量カップ、電子レンジ、クッキングペーパー、成形型(自作)

(4) 研究方法

ア：「3. 研究準備」でしめした「固形物の作成方法ア～ウ」により生成した生成物をそのまま乾燥させた後、すり鉢で粉末状にする。

イ：粉末状にした生成物 8g に対して水 4g を混ぜる。

ウ：水を加えた生成物を成形型にて成形する。

エ：電子レンジ 600W の加熱（3 秒間）と加圧を繰り返し、固形物をひとまとめにする（固形物の粒が無くなり一体化する）。

(5) 研究結果

図 5 に固形物の作成結果 2 をしめす。一度乾燥させた生成物に水を追加する方法でも成形できることを確認した。ただし、従来の方法で作製した固形物と比較をすると表面にざらつきが残り易いことがわかった（図 6）。

作成日	作成結果
2024.08.06	
2024.08.11	

図 5 固形物の作成結果 2



図 6 成形した固形物表面の比較

また、図 7 に自然乾燥による質量変化、図 8 に自然乾燥期間のグラフをしめす。本調査により、中間固形物に再び水を追加して成型した方が、成形後の乾燥期間を短縮できることが分かった。

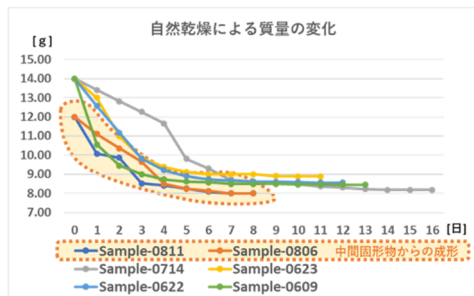


図 7 自然乾燥による質量変化

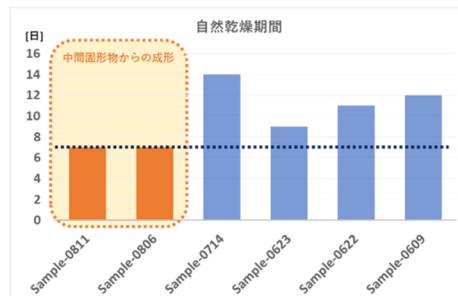


図 8 自然乾燥期間

(6) 考察

成形後の乾燥期間を短縮できた原因は、乾燥開始時の水分量にあると考える。一度乾燥させた生成物に再度水を加える方法であれば、成形前の水分量を制御することが容易にできる。また、この方法の場合、乾燥後の質量・体積を事前に把握することができるため、①成形に必要な分量の材料だけを用意することができる（従来の方法では、乾燥により縮小するサイズが分かりにくく、材料を多めに用意して不要な分量を捨てる必要があった）。②乾燥が完了したことの判断が容易になる（従来の方法では、完全に乾燥した状態の正確な質量が分からないため、質量変化を確認し、変化がなくなる状態で判断していた）。というメリットがあることに気付いた。一方で、固形物の表面にざらつきが残った原因は、水が粉末の固形物に対して均一に混ざらなかったことが原因であると考えられる。

4 研究 2 固形物の切削加工に関する研究

(1) 研究概要

プラスチックの一般的な加工方法として、「切削加工」と「成形加工」がある。「切削加工」の最大のメリットは精密で複雑な形状に加工ができる点にある。一方で、材料の削り取りにより、生産過程で材料の無駄が発生しやすいこと、切削加工に時間を要し、大量生産には向かないことが多いことがデメリットとなる。

そこで、自作の固形物を使用して切断・切削・研磨を行い、切削加工の適正を確認する。

(2) 確認内容

ア：切断加工の確認

プラスチック用片刃鋸を用いて固形物の切断加工を実施した。

イ：切削加工の確認

彫刻刀を用いて固形物の切断加工を実施した。

ウ：研磨加工の確認

合成樹脂用ヤスリを用いて固形物の研磨加工を実施した。

(3) 研究結果・考察

図9に切断・切削・研磨加工の様子とその結果をしめす。いずれの固形物においても切断した断面は、固形物が欠けることなく、中に空洞が無いことを確認した。そして、切削による形状を変更させ、研磨加工で表面を滑らかにすることができた。期待していた切断・切削・研磨加工をすることができたことから、工業製品として、代替プラスチック材料として検討できる可能性があると考えた。

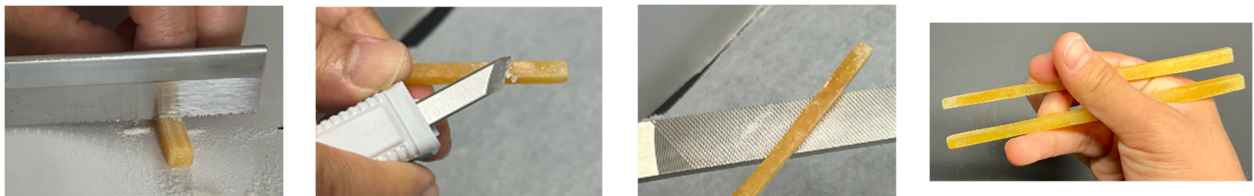


図9 加工の様子と結果

5 研究3 固形物の再成形に関する研究

(1) 研究概要

今までの研究で成形に失敗した固形物や、研究2の切削作業で発生した削りクズを利用して再度、固形物を成形することができるか調査をする。ここで、使用する固形物は、成形時に一度加熱をしているため、①粉末をそのまま再加熱する方法と②粉末に水を追加してから再加熱する方法で比較調査を行った。

(2) 材料

固形物の粉末（成形で失敗した固形物、切削研究の削りクズ）、水

(3) 道具

すり鉢、すりこぎ、合成樹脂用ヤスリ、袋、電子はかり、軽量カップ、電子レンジ、クッキングペーパー、自作成型型2(図10)

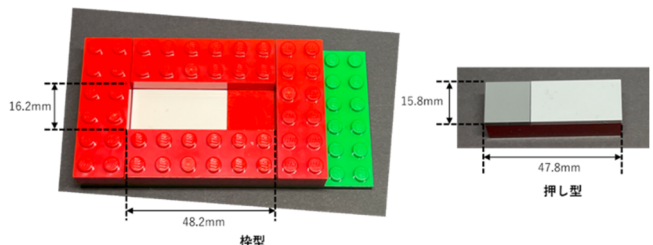


図10 自作成型型2

(4) 研究方法

ア：固形物をすり鉢・合成樹脂用やすりで粉末状にする。

イ：素材を用意する

その①・・・何もしない（固形物4gを計量し、そのまま使用する）。

その②・・・袋にて粉末状にした固形物4gに対して水2gを混ぜる。

ウ：素材（その①、またはその②）を成型型に入れて成形する。

エ：電子レンジ600Wの加熱（3秒間）と加圧を繰り返し、固形物をひとまとめにする（固形物の粒が無くなり一体化する）。

(5) 研究結果

図11に再成形の研究結果をしめす。固形物の粉末をそのまま再加熱したものは、非常にもろく、簡単に粉々になった。一方で粉末に水を追加した後、再加熱したものは、見た目が変わり（光沢が発生）、ひとまとまりにできた（固形物の粒が無くなり一体化した）。

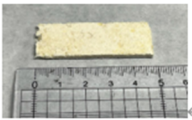
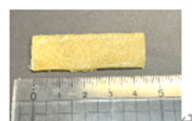
素材		型にはめた様子	結果 1	結果 2
粉末のみ				
				
粉末 + 水				

図 1 1 再成形の研究結果

(6) 考察

水を混ぜることで、固形物の再成形ができたので、切削加工で発生する切削クズや使用済の固形物を再利用でき、環境に良い材料になると考えた。

6 研究 4 熱可塑性・耐熱性に関する研究

(1) 研究内容

自作した固形物を加熱し、熱可塑性の確認と耐熱性について調査する。可塑性とは、力を加えると変形し、力を除いても元に復元しない性質であり、加熱によって可塑性をしめすプラスチックが熱可塑性プラスチックとなる。

(2) 材料

Sample-A：スキムミルクと酢を混ぜて生成した中間固形物（加熱前）

Sample-B：スキムミルクと酢を混ぜて生成した固形物（加熱済）

Sample-C：Sample-B 同様の固形物を粉末状に加工した物質

Sample-D：Sample-C 同様の粉末を再成形した物質

比較 Sample：市販の生分解性プラスチック（ストロー）

(3) 道具

フライパン、ガスコンロ、ガスボンベ

(4) 研究方法

フライパンに乗せた固形物をガスコンロにて加熱し、固形物の変化を観察した。

(5) 研究結果

図 1 2 に固形物の加熱前後の観察結果をしめす。市販の生分解性プラスチックは加熱によって変形したが、自作の固形物はいずれも可塑性を確認する前に焦げや膨張が発生した。

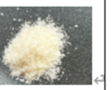
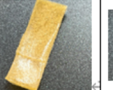
	Sample-A	Sample-B	Sample-C	Sample-D	比較 Sample
加熱前					
加熱後 (1)					
加熱後 (2)					

図 1 2 熱可塑性・耐熱性の研究結果

(6) 考察

本研究結果より、自作した固形物には熱可塑性が無い。また、耐熱性も高くないと判断した。そして、自作した固形物は、カゼインプラスチックではない別の物質となっている可能性があると考えた。

7 研究 5 耐水性・吸水性に関する研究

(1) 研究内容

固形物の耐水性・吸水性を調査するため、固形物を浸水させ、状態変化を確認する。本研究では、水温を一定に保つ環境が用意できなかったため、室温下の常温水（約 26℃）で実施する。また、固形物は質量を基準としたため、体積は同一化できていない。吸水率は、研究開始前の質量（吸水前の質量）と浸水後の質量（吸水後の質量）を測定し、以下の式（1）により算出した。

吸水率（％）＝
$$\frac{\text{吸水後の質量} - \text{吸水前の質量}}{\text{吸水前の質量}} \times 100 \quad \cdots \text{式（1）}$$

(2) 材料

Sample-0427：「3. 研究準備」で2024.4.27に作成した固形物
Sample-0428：「3. 研究準備」で2024.4.27に作成した固形物
Sample-0430：「3. 研究準備」で2024.4.30に作成した固形物
Sample-0501：「3. 研究準備」で2024.5.1に作成した固形物

(3) 道具

コップ、水（市販の飲料水）、電子はかり、ノギス

(4) 確認手順

- ア：自作の固形物を約2 cmで切断する。
- イ：切断した固形物を合成樹脂用やすりで削り、質量が1.00g となるように調整する。
- ウ：コップに水（市販の飲料水）50ml を入れた容器に固形物を浸水させる。
- エ：24 時間後まで定期的に固形物の様子を観察する。
- オ：24 時間浸水させた固形物を自然乾燥させ、変化を確認する。

(5) 研究結果

表 1、図 1 2 に24 時間浸水における質量と吸水率の確認結果をしめす。研究の結果、Sample-0428 と Smaple-0430 が最も早く質量の変化が見られ、さらに Sample-0428 は、24 時間後の吸水率が63%と最も高くなった。一方で Sample-0427 と Sample-0501 は、2 時間後まで質量の変化が見られず、Sample-0427 は、24 時間後の吸水率が48%となり最も低い値となり、確認結果として個体差のある調査結果となった。

(6) 考察

吸水率に個体差が見えた理由は、固形物の出来栄え（表面の滑らかさや、密度）が異なっているためであると考えた。この差分は、加熱の時間と温度、加圧の時間や圧力、固形物の乾燥環境（気温・湿度）を均一とすることで小さくできると考える。

表 1 質量と吸水率の変化

経過時間	Sample-0427		Sample-0428		Sample-0430		Sample-0501	
	質量 [g]	吸水率 [%]	質量 [g]	吸水率 [%]	質量 [g]	吸水率 [%]	質量 [g]	吸水率 [%]
開始	1.00	-	1.00	-	1.00	-	1.00	-
15分後	1.00	0%	1.00	0%	1.00	0%	1.00	0%
30分後	1.00	0%	1.12	12%	1.11	11%	1.00	0%
1時間後	1.00	0%	1.16	16%	1.11	11%	1.00	0%
2時間後	1.00	0%	1.20	20%	1.18	18%	1.00	0%
4時間後	1.14	14%	1.29	29%	1.23	23%	1.17	17%
6時間後	1.18	18%	1.33	33%	1.29	29%	1.22	22%
12時間後	1.32	32%	1.47	47%	1.43	43%	1.35	35%
24時間後	1.48	48%	1.63	63%	1.59	59%	1.54	54%

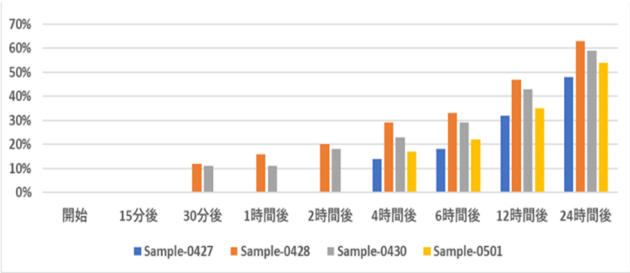


図 1 2 吸水率の変化

本研究により、作成した固形物は2 時間程度の浸水には耐性があるが、24 時間以上の浸水には耐えることが難しいと考える。このことから水の存在する環境における本固形物の利用には、工夫や使用制限を設ける必要があると考えた。一方で、50%程度の吸水性があることから、芳香剤に使用するような吸水ポリマーのように、固形物に液体を保持させる素材として利用できる可能性があると考えた。

7 研究6 自然分解性能に関する研究

(1) 研究概要

固形物の自然分解性能を調査するため、固形物を土・砂・水の中に放置し、分解の様子を観察する。ここで、自然分解の方法は、2023 年度までに実施してきた生分解性プラスチックの土分解の研究結果を元に調査条件を決定した。

(2) 材料

自作した固形物（詳細は研究結果に記載）、市販の生分解性プラスチック

(3) 道具

コップ（蓋つき）、水道水、砂、土

砂と土は本分解研究のために園芸用の黒土に家庭の生ごみや残飯、分解研究で確認した後の土を入れて、微生物を増やしたコンポストの土を使用している。ただし、コンポストの土は、分解途中のごみが残っているため、土を篩にかけ、乾燥させた砂とこの砂に水を追加したもの（土団子が作成でき、余分な水分がにじみ出ない状態を目安）を分解研究用の土としている。

(4) 研究方法

土・砂・水の中に自家製の固形物を入れて4週間後の状態を観察する。各容器は蓋で密閉し、室内（約26℃）で保管した（図13）。

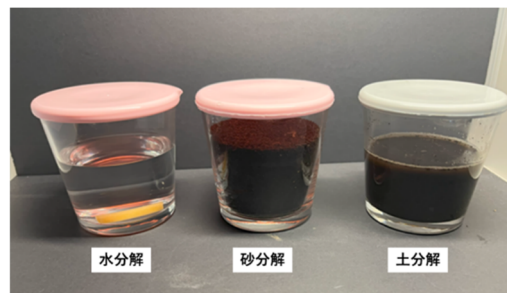


図13 分解研究の様子

土は、2023年度の分解研究結果を踏まえ、比較対象とする市販の生分解性プラスチック（ストロー）が、分解できる条件「土175gに対して水を15～20g追加した状態の土として、比較確認をする。一方、市販の生分解性プラスチックが水や砂で分解出来ないことを過去の研究で確認しているため、今回は比較調査を省略した。

(5) 研究結果

図14に土分解の結果をしめす。いずれの固形物も4週間後の固形物は、形状をとどめることができるぎりぎりの状況であった。また、4週間後はとても強烈な異臭が発生した。図15は、比較対象となる市販の生分解性プラスチックの分解結果となる。昨年度の分解研究同様の結果となり、自作固形物が同様の条件で自然分解させることを確認した。

	土分解2#1	土分解2#2	土分解2#3	土分解2#4
分解期間	2024.6.8 ～ 2024.7.6	2024.6.15 ～ 2024.7.13	2024.6.22 ～ 2024.7.20	2024.6.29 ～ 2024.7.2
サンプル	2024.4.27 作成	2024.4.28 作成	2024.4.30 作成	2024.5.1 作成
開始時				
4週間後				
乾燥後				
土の様子（土175g + 水20g）				
開始時				
4週間後				
取出し時の様子				

図14 土分解の様子

	土分解1 比較サンプル#1	土分解1 比較サンプル#2	土分解1 比較サンプル#3	土分解1 比較サンプル#4
分解期間	2024.5.11 ～ 2024.6.8	2024.5.18 ～ 2024.6.15	2024.5.25 ～ 2024.6.22	2024.6.1 ～ 2024.6.29
サンプル	市販品	市販品	市販品	市販品
4週間後				
土の様子（土175g + 水15g）				
開始時 土175g 水15g				
4週間後				
取出し時の様子				

図15 土分解の様子（比較研究）

図16に砂分解の結果をしめす。いずれも4週間後は砂の菌に包まれた状態であったが、砂分解#1&2は肉眼では判別できないほど小さな虫が付着しており、固形物が餌にされていた（ように見えた）。

一方で砂分解#3&4は、カビのような菌で覆われており、固形物が柔らかくなるとともに周囲の砂と一体化しており、固形物だけを分離することができなかった。

図17に水分解の結果をしめす。固形物ごとに水の色に違いは発生したが、いずれの固形物もほとんど固形物が残らなかった。また、とても強烈な異臭が発生した。

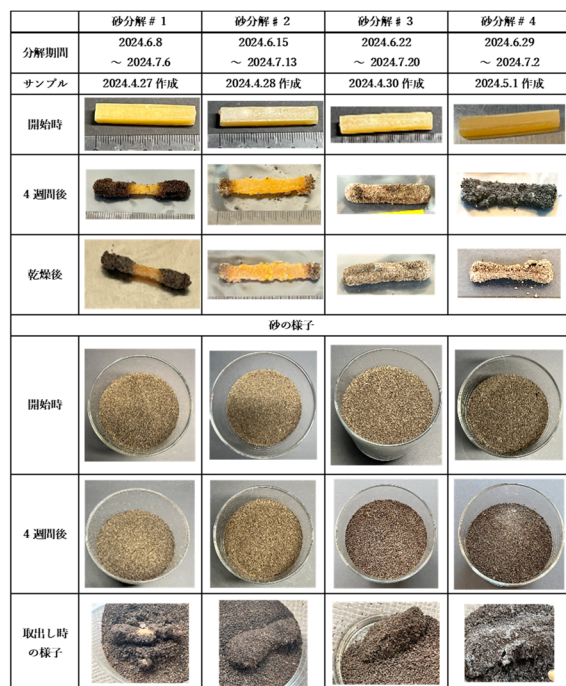


図 1 6 砂分解の様子

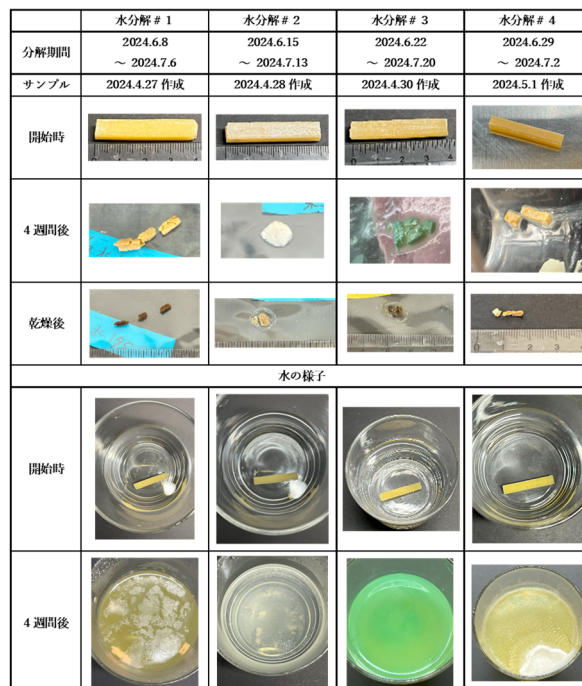


図 1 7 水分解の様子

(5) 考察

自作した固形物は、市販の生分解性プラスチックと異なり、砂や水環境でも自然分解することが分かった。このことから自作の固形物は、自然環境にとって優しい素材となる可能性が高いと考える。ただし、自然分解し易いということは、耐久性が低いということになる。使い捨ての商品に利用するなど素材の特性を生かした工夫や、使い方の制約条件をつける必要があると考えた。

8 まとめ

今回の研究では、固形物の成形において「スキムミルクと酢を混ぜて出来た生成物を一度乾燥させ改めて水を加える成形方法」や「一度成形した固形物を粉末にして、水を加えることで再利用する方法」の有用性を確認することができた。また、固形物の性能の確認結果として、切削加工に適性があること。熱可塑性がなく、耐水性があまり高くないこと。砂や水でも自然分解ができることが確認できた。このことから、想定していたカゼインプラスチックとは、異なる物質を作成している可能性があると考えられる。

9 今後の展望

本研究により、自作した固形物の特性が分かったことで、この固形物がカゼインプラスチックではない可能性が高まった。固形物の特性調査を継続し、自作した固形物がどのような物質であるか判定したい。ただし、自作固形物がカゼインプラスチックではない場合であっても代替プラスチックの素材にできる可能性があると考えている。本素材について研究を進め実用性について検討したいと考える。

10 参考情報

※ 1 : 樹脂の切削加工 | 加工方法の種類や手順を解説

(<https://koyofirst.jp/resin-cutting/>)

※ 2 : プラスチックの構造と特性を理解しよう

(<https://plabase.com/news/271>)

※ 3 : プラスチックの物理性質 (2) — 吸水率および吸水特性 : プラスチック材料の基礎知識 (19)

(<https://plabase.com/news/10085>)

※ 4 : JISK7209:2000 プラスチックー吸水率の求め方

(<https://kikakurui.com/k7/K7209-2000-01.html>)