

筑波大学

朝永振一郎記念

第 17 回「科学の芽」賞 応募用紙

受付番号 : SJ0488

応募部門 : 中学生部門

応募区分 : 個人応募

題名 : ミルククラウンを探る ～ 綺麗なミルククラウンの条件とは!? ～ Part 2

学校名 : 岐阜県 多治見市立小泉中学校

学年 : 3 年生

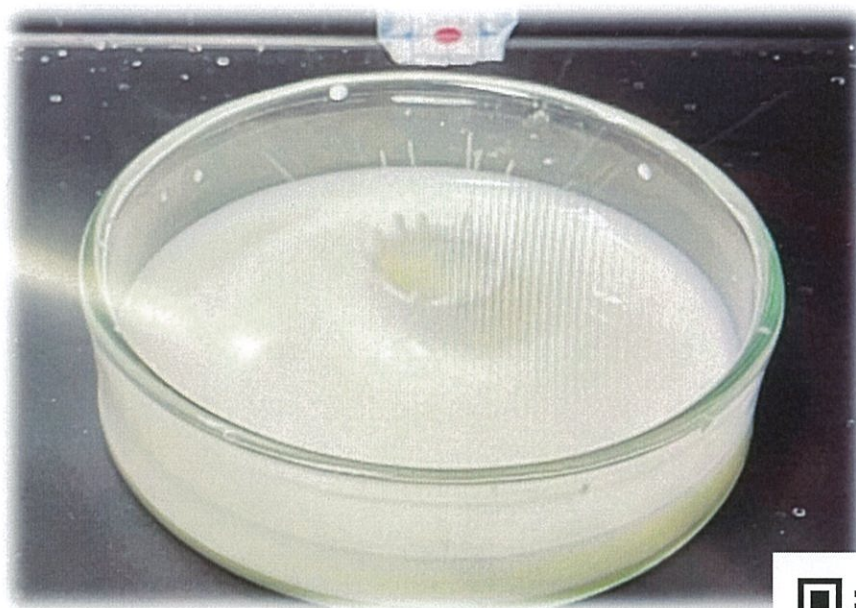
代表者名 : 坂崎 希実

※ 個人情報保護のため、入力された項目から抜粋して出力しています。

ミルククラウンを探る

～綺麗なミルククラウンの条件とは!?!～

Part 2



多治見市立小泉中学校

3年 坂崎希実

要旨

ミルククラウンはとても魅力的な現象ですが、再現性は難しい。不安定な要素がいつもあり、ミルククラウン現象を自由に操る事は不可能に近い。しかし、綺麗なミルククラウンを形成する各要素を明確にし、影響を及ぼす割合を加味したミルククラウンの法則を作ることで、誰でも簡単にミルククラウン現象を再現できると考えた。

ミルククラウンの法則を Beautiful Milk Crown (BMC) と定義する。

この法則を作るため、使用する液体の種類・使用する液体の温度・液滴を落とす高さ・下の液面の深さなどのパラメータを全て実験によりデータ化し、成形したミルククラウンの評価と相関分析を行った。

- ・液滴を落とす高さ ($70\text{cm} \leq x_1 \leq 110\text{cm}$)
- ・下の液面の深さ ($0.5\text{cm} \leq x_2 \leq 1.5\text{cm}$)
- ・使用する容器の大きさ ($75\text{mm} \leq x_3 \leq 120\text{mm}$)
- ・液体の温度 ($K_n \quad n=0^\circ\text{C}, 20^\circ\text{C}, 50^\circ\text{C}$)

それらの実験データから算出したミルククラウンの法則(BMC)は、下記となった。

$$\text{BMC} = (0.035x_1 + 2.01) + (-0.02x_2 + 5.767) + (-0.015x_3 + 6.836) + 5.70K_n$$

但し、落とす液滴:牛乳、下の液面の液体:牛乳の場合。法則と実験値との決定係数は、 $R^2=0.51$ である。

しかし、液滴を落とす高さと液体の温度は、綺麗なミルククラウンを作る要因としての割合が大きいいため、この2つの要因のみで算出したミルククラウンの法則は下記となった。

$$\text{BMC} = (0.035x_1 + 2.01) + 5.70 K_n$$

但し、落とす液滴:牛乳、下の液面の液体:牛乳の場合。法則と実験値との決定係数は、 $R^2=0.95$ である。

ミルククラウンを形成する、さまざまなパラメータをデータ化し、法則(式)を作ることで、ミルククラウンを操ることができることが分かった。

現在、ミルククラウン現象は、GDI エンジン(燃料直噴エンジン)やインクジェットプリンタなど、様々な工業製品の内部で実際に生じており、これらの性能向上のため、現象の解明が求められている。⁽¹⁾

ミルククラウン現象のデータを解析し、ミルククラウンの法則を作った本研究は、今後の技術発展の一端を担うと考える。

序論

昨年から引き続き行っているこの研究は、ミルクティーを作る際にできたミルククラウンに興味を持ったことが始まりである。そして昨年は、綺麗なミルククラウンを再現するため、液滴を落とす高さや液滴の粘性などを変えて実験をした。

昨年の結論は、ミルククラウンを綺麗に作るには、高さ100cm 深さ3cm 1滴の重さ0.15g 標準容器(直径58mm 高さ約8cmの円柱状)を使用。液体の種類は落とす液滴も液面も牛乳が良い。しかし、落とす液滴を水にすると少しだけ綺麗にできる確率が上がった。

しかし、この条件を再現することは容易ではなく、ミルククラウン現象を身近に楽しむことができない。

今年は、綺麗なミルククラウン現象を簡単に再現する方法を見つけ、ミルククラウンの法則(BMC: Beautiful Milk Crown)を作ることを目的とした。

ミルククラウン現象については、液跳ねや表面張力波とあわせ、数多くの研究が行われてきている。⁽²⁾ また、容器に入った液体の深さが深いとミルククラウンにならないとの報告もある。⁽³⁾

しかし使用する液体の種類、液体の温度、容器に入った液面の深さ、落とす液滴の高さなどのパラメーターを変え、スマートフォンやiPadの動画撮影機能(スローモーション撮影)を使い、ミルククラウン現象を探った研究はほとんど行われていない。

また、誰もが簡単にミルククラウン現象を再現するための法則を掲示した研究は見られない。

本研究では、落とす液滴の種類、落とす高さ、下の液面の液体の種類、下の液体が入っているシャーレの大きさ、使用する液体の温度を変えることで、各要素が綺麗なミルククラウンに及ぼす影響を数値化し、ミルククラウンの法則(BMC)を作る。

BMCを参考にすることで、誰もがミルククラウン現象を簡単に楽しむことができる。そして物理学(流体力学)を身近に感じることができる。

本論

実験①から⑥を行い、液滴と液面との現象を探る。

実験の基本手順

- ① 容器に液を注ぎ、液面を作る。
- ② 液面に液滴を落とす。各条件で10回ずつ液滴を落とす。
- ③ スマートフォンの動画撮影機能(1/1000秒)にて、液滴が液面に落ちる瞬間を撮影する。
- ④ 撮影した液面の状態を評価する。
容器、注ぐ液、液滴、液滴を落とす高さ、容器に注ぐ液の深さ、等の条件を変更し、実験を行う。



撮影したミルククラウン



実験の様子

実験に使った物

・液体

昨年の結果より、安定して綺麗なミルククラウンを作ることができる、水と牛乳を使用する。又牛乳と水を1:1の比率で混ぜた混合液も使用する。



・容器

昨年は、家にある容器を使用していたが、今年は、安定して液面の条件を作ることができるシャーレ(大)(中)(小)を使用した。

シャーレ(大)	直径	120mm	深さ	30mm
シャーレ(中)	直径	90mm	深さ	20mm
シャーレ(小)	直径	75mm	深さ	20mm



・液滴を垂らす道具

昨年は、駒込ピペット、たれびん、ストローを使用していたため、液滴の分量が安定しなかった。今年は、改善のため、マイクロピペットを使用して、液滴の分量が安定するようにした。

去年のデータより液滴が重いほど、綺麗なミルククラウンができやすいことが分かったが、余り重くすると液滴が2滴に分解して落ちてしまうため、2滴にならないで一番重くなる1滴の量を20 μ lとした。

マイクロピペット(CGOLDENWALL 製)

液体種類	1滴 20 μ lの重さ
水	20mg
牛乳	21mg
混合	20mg



1滴の重さは、10回ずつ計量し、平均値を出した。

・スマートフォン

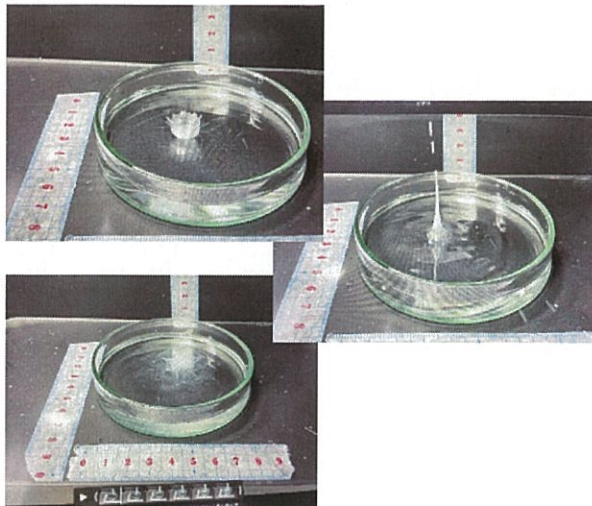
iPad Pro カメラ スロー撮影機能(1/1000秒)

・メジャー

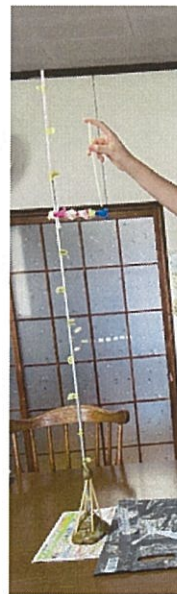
・液滴を基準の高さから、容器の中央に落とす治具（タワー2型）

昨年のタワーは手作りのため、同じ位置に安定して液滴を落とすことができなかった。今年は、スタンドとクランプを使用して実験を行い、安定して同じ位置に液滴を落とすことができた。

タワー2型の設置には、水平器にて水平を出しながら行った。



ミルククラウンの様子



昨年のタワー



今年のタワー

ミルククラウンの分類

ミルククラウンを下記の表に分類し、評価する。（昨年のデータより）
評価点が高いほど、綺麗なミルククラウンとする。

表1. ミルククラウンの分類一覧

分類	評価点	例	分類	評価点	例
A+	6	綺麗なクラウン！！ 	B+	2	跳ねるこけしになる。 
A(+)	5	少し形の崩れたクラウン 	B	1	跳ねるこけしにならない 
A	4	クラウンの形だが先端がない 	C	0	跳ねない 
B++	3	クラウンの様なものができる 			

実験①

綺麗なミルククラウンを作ろう！

基礎実験 水・牛乳・混合の液面に、水・牛乳・混合の液滴を落とし綺麗なミルククラウンができる条件を探る。

実験① 水・牛乳・混合の液面に水・牛乳・混合の液滴を落とす

方法

- ・シャーレ(中)に水を注ぐ。深さは1cmとする。
- ・水・牛乳・混合を落とす高さを、70cmから110cmまで10cm間隔で変える。
- ・水・牛乳・混合は、マイクロピペット(1滴 20 μ l)で落とす。

結果

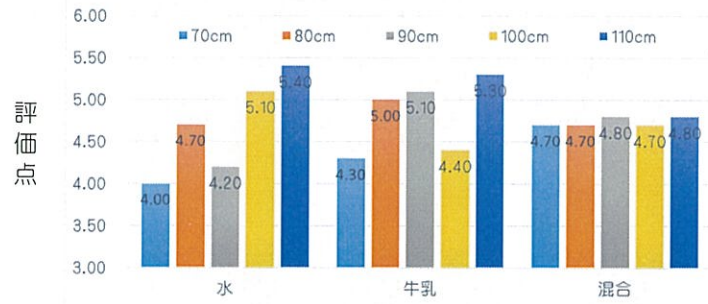


図1. 液面が水共通で液滴(水・牛乳・混合)を変えた評価点平均値の比較

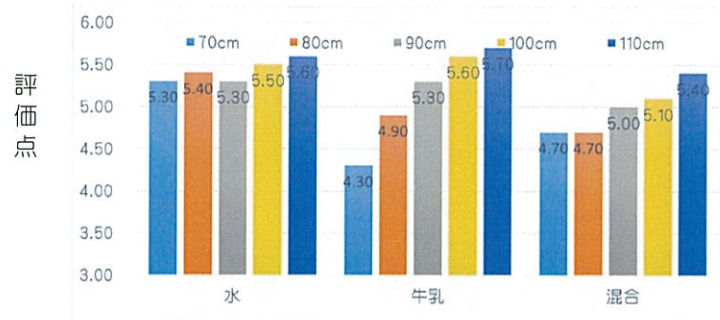


図2. 液面が牛乳共通で液滴(水・牛乳・混合)を変えた評価点平均値の比較

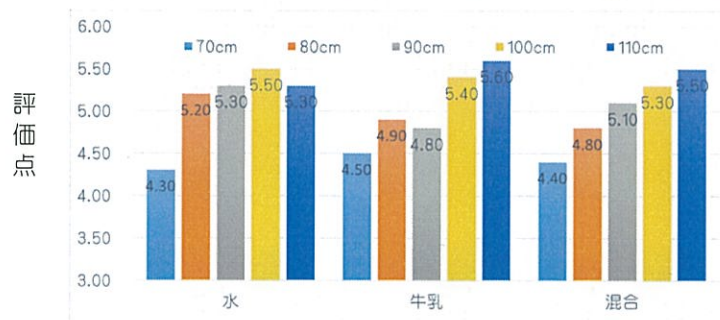


図3. 液面が混合共通で液滴(水・牛乳・混合)を変えた評価点平均値の比較

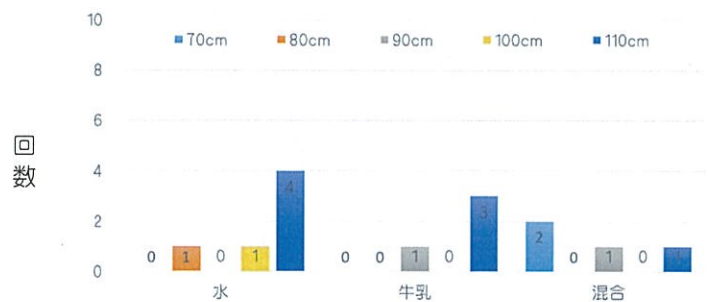


図4. 液面が水共通で液滴(水・牛乳・混合)を変えた評価点6以上の回数の比較

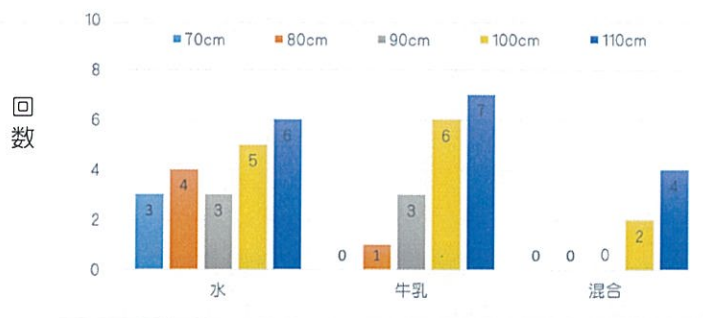


図5. 液面が牛乳共通で液滴(水・牛乳・混合)を変えた評価点6以上の回数の比較

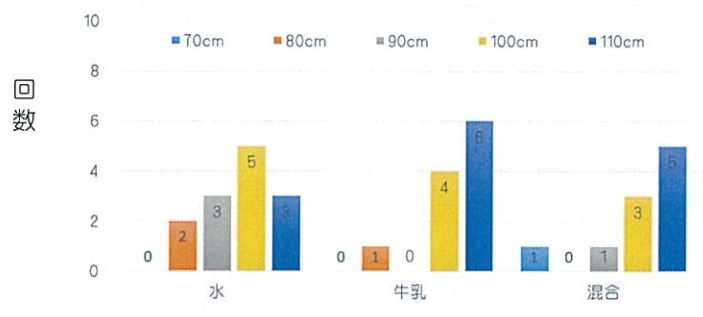


図6. 液面が混合共通で液滴(水・牛乳・混合)を変えた評価点6以上の回数の比較

実験①の考察

図1、図2、図3より、牛乳の液面に、牛乳の液滴を、110cmの高さから落とすと、評価点の平均が5.70となり一番高くなることが分かった。

評価点の平均が5.60の僅かの差で、2番目に高くなったのは、牛乳の液面に、水の液滴を、110cmの高さから落とす場合と、混合の液面に、牛乳の液滴を110cmの高さから落とす場合であった。

去年の結果では、牛乳の液面と水の液滴の組み合わせが綺麗なミルククランを作る確率が一番高くなったが、牛乳の液面と牛乳の液滴の組み合わせの確率も僅かな差であったことから、昨年と同等の結果になった。

図4、図5、図6より、液滴を落とす高さ70cm～110cmの評価点6点以上の合計回数を比較すると、牛乳の液面で水の液滴の組み合わせが21回となり、最も綺麗なミルククラウンになった回数が多いことが分かった。

又、図4、図5、図6ごとで、評価点6点以上の合計回数を比較すると、牛乳の液面の回数が最も多いことが分かった。

牛乳(44回) > 混合(35回) > 水(14回)

図1、図2、図3より、牛乳の液面に、牛乳の液滴を、110cmの高さから落とすと綺麗なミルククラウンができる確率が高いことが分かった。

しかし、図4、図5、図6より、液滴の落とす高さの条件を取り除くと、牛乳の液面と水の液滴の組み合わせが、綺麗なミルククラウンができる確率が高いことが分かった。

液面、液滴の種類に関係なく、液滴を落とす高さのみを評価点(平均値)とし比較した結果図7に示す。

高さ、液滴の種類に関係なく、液面の種類にて評価点(平均値)を比較した結果を図8に示す。

高さ、液面の種類に関係なく、液滴の種類にて評価点(平均値)を比較した結果を図9に示す。

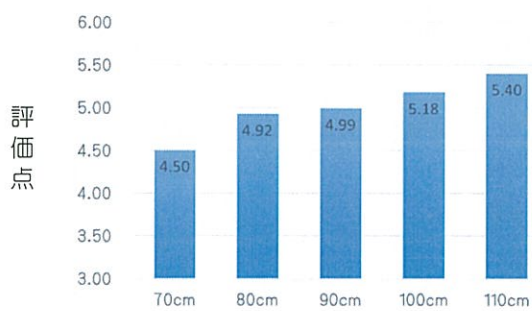


図7. 高さによる評価点平均値の比較

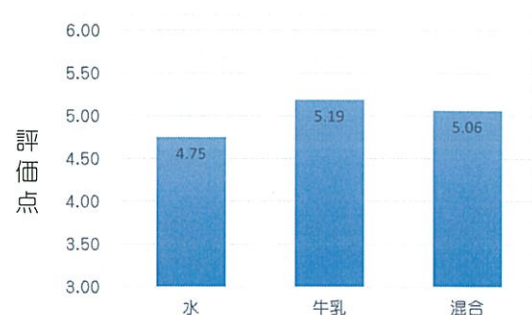


図8. 液面による評価点平均値の比較

図7より、液滴を落とす高さに比例して、綺麗なミルククラウンを作る評価点が高くなることが分かった。

図8より、液面の牛乳、混合、水の順番で、綺麗なミルククラウンを作る評価点が高くなることが分かった。

図9より、液滴の水、牛乳、混合の順番でわずかな差ではあるが、綺麗なミルククラウンを作る評価点が高くなることが分かった。

液滴と落とす高さ、液面の種類、液滴の種類では、綺麗なミルククラウンを作る評価点に対して影響する量が異なることが分かった。下記の表示に示す。

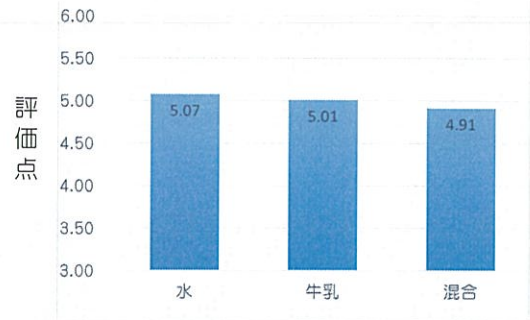


図9. 液滴による評価点平均値の比較

表2. 評価点に対する影響

	評価点の最大と最小の差	評価点への影響
液滴を落とす高さ	0.90	大きい
液面の種類	0.44	中ぐらい
液滴の種類	0.16	小さい

特に液滴を落とす高さは、評価点の変化に大きく影響する。

実験②

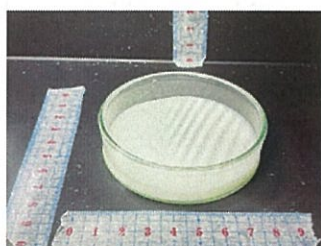
液面の条件を変えてみる

昨年の実験で、ミルククラウン現象に容器の形状と、液面の深さが関係していることが確認できた。基礎実験①においてミルククラウン現象のできやすい条件が明確になったため容器の形状、及び液面の深さが、ミルククラウンに及ぼす影響を探る。

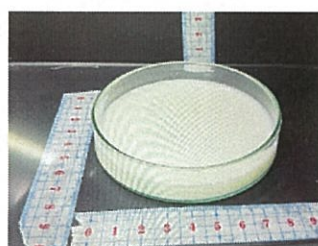
実験② 容器シャーレ(小、中、大)の液面に液滴を落とす

方法

- シャーレ(小、中、大)に牛乳を注ぐ。
- 深さは0.5cm、1.0cm、1.5cmと変える。
- 牛乳を落とす高さを、110cmとする。
- 牛乳は、マイクロピペット(1滴 20μl)で落とす。



深さ 0.5cm



深さ 1.0cm



深さ 1.5cm

結果

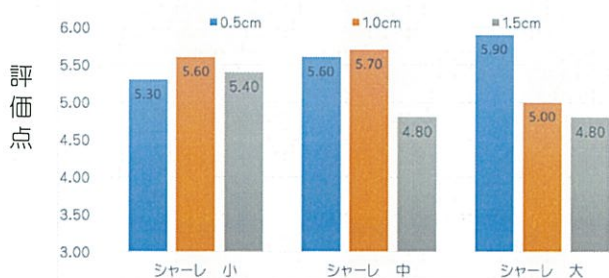


図10. シャーレの大きさを変えた評価点平均値の比較

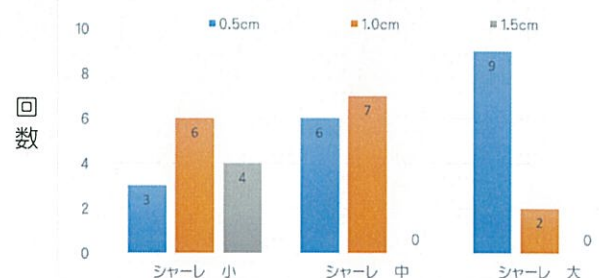


図11. シャーレの大きさを変えた評価点6以上の回数比較

実験②の考察

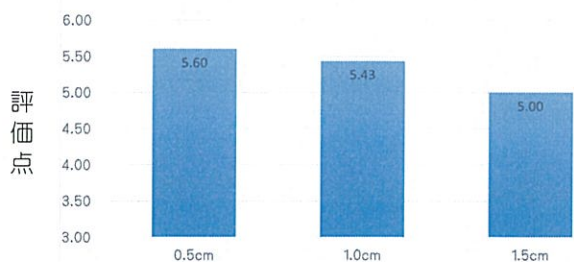


図12. 液面の深さによる評価点平均値の比較

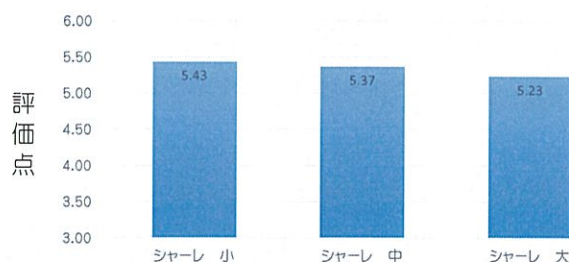


図13. シャーレの大きさによる評価点平均値の比較

図10より、シャーレ(大)、液面の深さ0.5cmの評価点の平均が5.90となり一番高くなることが分かった。
 図11より、液面の深さ0.5cm、1.0cm、1.5cmの評価点が6以上の合計回数を比較すると、シャーレの大きさで差がないことが分かった。

$$\text{シャーレ(小)}(13\text{回}) = \text{シャーレ(中)}(13\text{回}) > \text{シャーレ(大)}(11\text{回})$$

図11より、0.5cm、1.0cm、1.5cmの液面の深さ毎に評価点が6以上の合計回数を比較すると、0.5cmの液面の深さが最も多いことが分かった。

$$0.5\text{cm}(18\text{回}) > 1.0\text{cm}(15\text{回}) > 1.5\text{cm}(4\text{回})$$

図12より、液面の深さに比例して、綺麗なミルククランを作る確率が反比例することが分かった。

図13より、シャーレの大きさにより、小、中、大の順番で、綺麗なミルククランを作る確率がわずかに反比例することが分かった。

液面の深さ、シャーレの大きさでは、綺麗なミルククランを作る評価点に対して影響する量が異なることが分かった。下記の表示に示す。

表3. 評価点に対する影響

	評価点の最大と最小の差	評価点への影響
液面の深さ	0.60	中ぐらい
容器の大きさ	0.20	小さい

実験③

使用する液体の温度を変えてみる

基礎実験①にてミルククラウン現象のしやすい条件が明確になったので使用する液体の温度が、ミルククラウンに及ぼす影響を探る。

実験③ 液体の温度を変えて液滴を落とす

方法

- シャーレ(中)に牛乳を注ぐ。深さは1cmとする。
- 牛乳を落とす高さを、110cmとする。
- 牛乳は、マイクロピペット(1滴 20μl)で落とす。
- 牛乳の温度を、4℃、20℃(常温)、50℃と変える。

結果

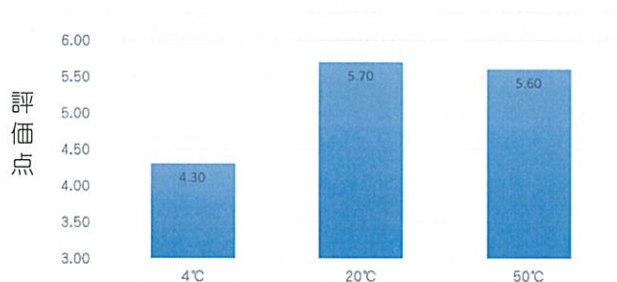


図14. 液面の温度を変えた評価点平均値の比較

実験③の考察

図14より、1番評価点の平均が高かったのは、牛乳の温度が20℃の場合だった。評価点の平均が5.70だった。又、2番目に高かったのは50℃の場合だった、評価点の平均が5.60だった。

図14より、牛乳の温度は20℃以上で、綺麗なミルククランを作る確率が高くなることが分かった。

実験④

綺麗なミルククラウンの法則

実験①～③の結果より、綺麗なミルククラウンができる法則を探る

方法

牛乳の液滴と牛乳の液面について、「液滴を落とす高さ」「液面の深さ」「容器の大きさ」「液体の温度」の各変化量が、評価点にどのように関係している関数を作成する。

作成した各関数に、変化量を入力し、算出された値を、合算したものをBMC値とする。

近似値線、決定係数の算出は、エクセルの機能を使用した。

結果

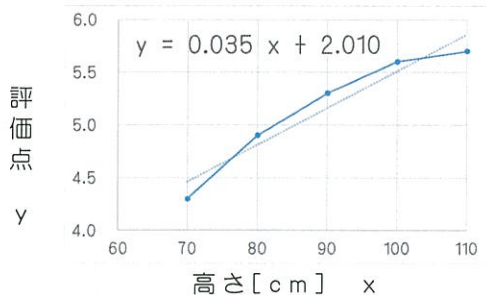


図15. 液滴を落とす高さ と評価点の関係

条件: 液面の深さ 1.0cm シャーレ(中)
液体の温度 20℃

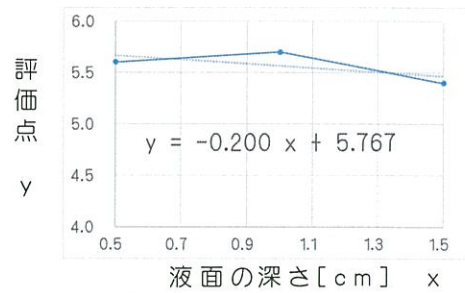


図16. 液面の深さと評価点の関係

条件: 液滴を落とした高さ 110cm
シャーレ(中) 液体の温度 20℃

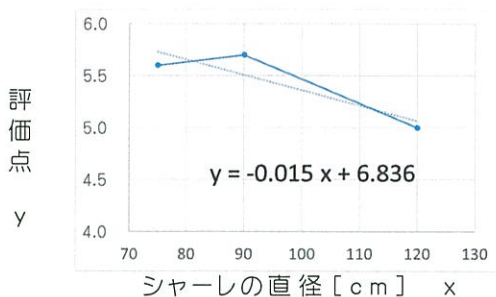


図17. シャーレの大きさと評価点の関係

条件: 液滴を落とした高さ 110cm
液面の深さ 1.0cm
液体の温度 20℃

表4. 液体の温度と評価点の関係

条件: 液滴を落とした高さ 110cm、液面の深さ 1.0cm、シャーレ(中)

温度	評価点	20℃時の評価点からの比率 K_n
4℃	4.30	$K_{0℃} = 0.75$
20℃	5.70	$K_{20℃} = 1.00$
50℃	5.60	$K_{50℃} = 0.98$

実験③の考察

図15、図16、図17、表4より、算出した評価点₁₋₄を加算して、BMC値とした。

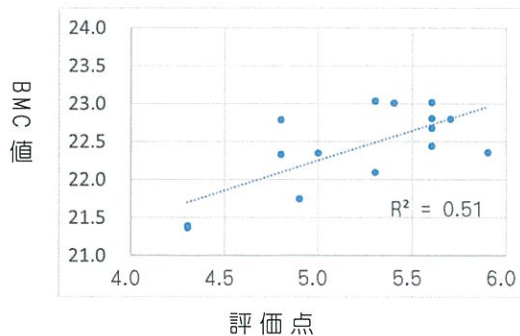


図18. 各測定結果とBMC値の算出値の比較
BMC = 評価点₁ + 評価点₂ + 評価点₃ + 評価点₄
「液滴を落とす高さ」「液面の深さ」
「容器の大きさ」「液体の温度」

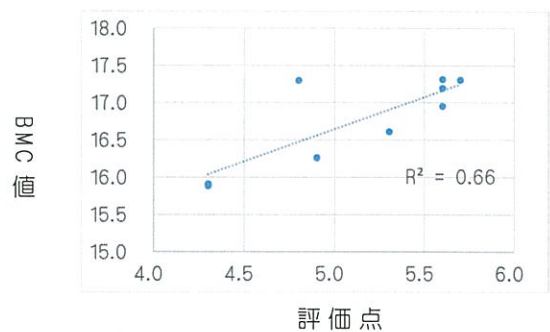


図19. 各測定結果とBMC値の算出値の比較
BMC = 評価点₁ + 評価点₂ + 評価点₄
「液滴を落とす高さ」「液面の深さ」「液体の温度」

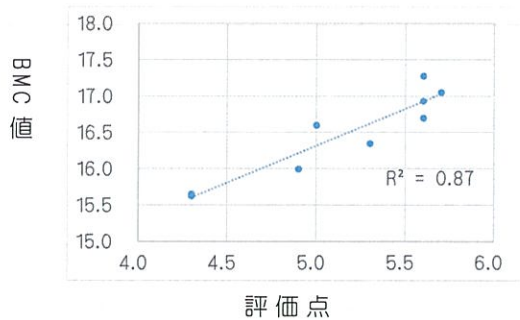


図 20. 各測定結果と BMC 値の算出値の比較
 $BMC = \text{評価点}_1 + \text{評価点}_3 + \text{評価点}_4$
「液滴を落とす高さ」「容器の大きさ」「液体の温度」

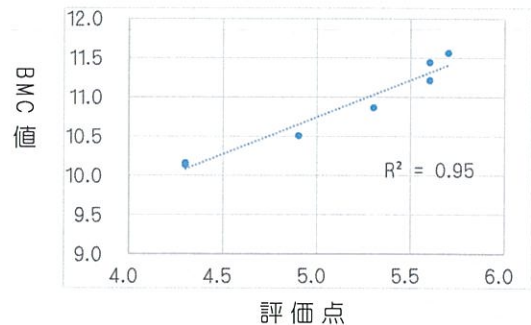


図 21. 各測定結果と BMC 値の算出値の比較
 $BMC = \text{評価点}_1 + \text{評価点}_4$
「液滴を落とす高さ」「液体の温度」

表 5. 各 BMC 値と実測評価値の決定係数

BMC 値	実測評価値との決定係数
評価点 ₁ + 評価点 ₂ + 評価点 ₃ + 評価点 ₄	$R^2 = 0.51$
評価点 ₁ + 評価点 ₃ + 評価点 ₄	$R^2 = 0.66$
評価点 ₁ + 評価点 ₂ + 評価点 ₄	$R^2 = 0.87$
評価点 ₁ + 評価点 ₄	$R^2 = 0.95$

実測評価点ともっとも決定係数が高いのは、BMC 値（評価点₁ + 評価点₄）の場合だった。決定係数が 0.95 であった。

結論と考察

昨年から引き続き行っているこの研究は、ミルクティーを作る際にできたミルククラウンに興味を持ったことが始まりである。そして昨年は、綺麗なミルククラウンを再現するため、液滴を落とす高さや液滴の粘性などを変えて実験をした。

昨年の結論は、ミルククラウンを綺麗に作るには、高さ 100cm 深さ 3cm 1 滴の重さ 0.15g 標準容器（直径 58mm 高さ約 8cm の円柱状）を使用。液体の種類は落とす液滴も液面も牛乳が良い。しかし、落とす液滴を水にすると少しだけ綺麗にできる確率が上がった。

しかし、この条件を再現することは容易ではなく、ミルククラウン現象を身近に楽しむことができない。

今年は、綺麗なミルククラウン現象を簡単に再現する方法を見つけ、ミルククラウンの法則（BMC : Beautiful Milk Crown）を作ることを目的とした。

実験①より、評価点が 1 番高い条件は、牛乳の液面に、牛乳の液滴を、110cm の高さから落とす場合であった。

2 番目に評価点が高くなったのは、牛乳の液面に、水の液滴を、110cm の高さから落とす場合と、混合の液面に、牛乳の液滴を 110cm の高さから落とす場合であった。この結果は昨年と同じである。

実験②より、評価点が 1 番高い条件は、シャーレ（大）、液面の深さ 0.5cm の場合であった。

実験③より、評価点が 1 番高い条件は、温度が 20℃ の場合だった。

実験④では、実験①～③にて条件付けした、下記の 4 要素でミルククラウンの評価と相関分析を行った。

- ・液滴を落とす高さ ($70\text{cm} \leq x_1 \leq 110\text{cm}$)
- ・下の液面の深さ ($0.5\text{cm} \leq x_2 \leq 1.5\text{cm}$)
- ・使用する容器の大きさ ($75\text{mm} \leq x_3 \leq 120\text{mm}$)
- ・液体の温度 ($K_n \quad n=0^\circ\text{C}, 20^\circ\text{C}, 50^\circ\text{C}$)

それらの実験データから算出したミルククラウンの法則（BMC）は、下記となった。

$$BMC = (0.035x_1 + 2.01) + (-0.02x_2 + 5.767) + (-0.015x_3 + 6.836) + 5.70K_n$$

* 落とす液滴：牛乳、下の液面の液体：牛乳の場合

この法則と実験値との決定係数は、 $R^2=0.51$ であった。

しかし、液滴を落とす高さと液体の温度は、綺麗なミルククラウンを作る要因としての割合が大きいため、この 2 つの要因のみで算出したミルククラウンの法則は下記となった。

$$BMC = (0.035x_1 + 2.01) + 5.70K_n$$

* 落とす液滴：牛乳、下の液面の液体：牛乳の場合

この法則と実験値との決定係数は、 $R^2=0.95$ であった。

今回算出した『ミルククラウンの法則』により
『綺麗なミルククラウン現象を簡単に再現する方法』は、
『暖かい牛乳の液面』
『高いところから牛乳の液滴を落とす』である。

今回は、落とす液滴の量を一定にし、その他の条件を変えて実験を行うことで、『ミルククラウンの法則』を算出したが、もう少し細かく検証する必要がある結果が多々あった。例えば、液体の温度分布、容器の大きさの影響、液面の深さの影響、ミルククラウンの形成時間、ミルククラウン形成時の音波などである。

ミルククラウン現象の要素を更に細かくデータ化することで、AIによるミルククラウンの評価も可能になると考えられる。

感想

今回の研究の目標は、誰でも簡単に綺麗なミルククラウンを作れるように『ミルククラウンの公式を作る!』でした。

そう決めた後に、ミルククラウンについてもっと深く知らなければ!と思いミルククラウンについての論文を改めて調べてみました。

その時に、色々な論文を読みました。ミルククラウンについての論文には、 h, r, ρ, θ や、ナビエ-ストークス方程式、といった、私は見たことも聞いたことも無い言葉と数式が沢山あり私は『?????????』でした。

そこで、私がやろうとしている事は、高校物理か、大学か、大学院で学ぶものであり、中学生には難しいのでは?と、不安になりました。

そして、案の定、式を作ることは難しかったです。

ですが!インターネットと、エクセルと、中学校で学んだ2年半分の知識を使い、ミルククラウンについて研究し、少しですが、公式を作る為の条件が見つかりました。

完璧な目標には、至りませんでした。が、ミルククラウンの法則(BMC)を作ることができました。データ取りは大変でしたが、そのデータをグラフ化して結果を見て考察するのは楽しかったです。

高校生になったら、更に物理について深く知ることができると思うので、ミルククラウンの法則(BMC)をさらに完成させたいです。

そして、この研究を深く追及することで、工業技術の発展に貢献できたら嬉しいです。

評価点が私の主観なので、流行りのAI画像解析で客観的に評価できたら……



そして、いつか教科書に載りたいです!

最後まで読んで頂き、ありがとうございました。

感想やアドバイス等、ありましたら、是非ご連絡下さい。

令和4年 坂崎希実

引用・参考文献

- 1) https://www.jstage.jst.go.jp/article/jasma/23/1/23_46/_pdf/-char/ja
- 2) <http://www.nara-gyunyuya.com/qa/crown.htm>
- 3) https://www2.nagare.or.jp/mm/2003/gunji/index_ja.htm
- 4) <https://www.higo.ed.jp/center/wysiwyg/file/download/1/1294>
- 5) http://www.amaki.okayamac.ed.jp/wordpress/wpcontent/uploads/2019/11/H28_2016_Amaki_AFP_4-min.pdf

謝辞

多治見市立小泉中学校、理科担当教諭の伊藤先生、本研究を始めるにあたり、快く実験器具(クランプ、スタンド、シャーレ)を貸して頂きました。正確な液滴を落下させたいと考えていた為、とても感謝しています。この実験器具が無ければ、この実験は難航していたと思います。ありがとうございました。

多治見市教育研究所主催、夏休み得意セミナー(科学作品中学生コース)担当の溝口先生、中川先生、具体的で適確なアドバイスをありがとうございました。両先生からのアドバイスで、実験の方向性が明確になりました。また科学研究の楽しさを再認識する機会にもなりました。