

ダイラタント流体の長期保存に適する身近な保存料の比較 ～防腐と特性保持の両立～

宮城県仙台第三高等学校 理数科

要旨

本研究では、水と片栗粉からなるダイラタント流体の防腐性向上および衝撃緩和特性の保持に適した、身近な保存料とその添加量の特定を目的とした。塩、砂糖、クエン酸、アスコルビン酸の4つの保存料を用いて、定温での経過観察による保存可能期間と鉄球が沈む時間による衝撃緩和特性の比較実験を行った。ダイラタント流体は、クエン酸、アスコルビン酸添加時に著しい防腐効果を示し、アスコルビン酸添加時はクエン酸添加時よりも特性を保持していた。加えて、アスコルビン酸の添加量を変え同様の比較実験を行った結果、本実験の4つの保存料の中で、アスコルビン酸の20～21%がダイラタント流体の保存に適すると結論付けた。

1 序論

ダイラタント流体とは、せん断力の増加に伴って粘性が増加することで、外部から圧力を受けた際に普通の液体のような振る舞いが一瞬、個体のような振る舞いになる非ニュートン流体のことを指す。一般的には、液体粒子とそこに溶けていない状態の固体粒子の混合物である。比較的粒径の大きな液体の粒子が、せん断力によってバラバラに散らばっていた状態から集まり固体の粒子モデルのように並んだことで隙間ができる。この隙間に比較的粒径の小さな液体粒子が入り込むことで表面上はその瞬間だけ固体のように見える。

この力学的特性は衝撃緩和性という点から新しい材料として近年、注目されている。一方で、従来のダイラタント流体に用いる片栗粉(原材料:加工澱粉)と水は腐敗しやすいという課題を持ち、長期間の保存および使用に適さなかった。実社会への応用に向けた課題解決のためには、水や片栗粉とは異なる、より安定的な物質を用いたダイラタント流体の検証が必然である。しかし、これに関してはすでに国立研究開発法人 物質・材料研究機構によって、より安定性かつ安全性に優れたダイラタント流体材料に関して、研究¹⁾が行われていた。そこで我々はダイラタント流体が子供向けの科学教室などの実

験に使用されているところに目をつけた。このような場では入手難易度の点からも広く水と片栗粉が材料として用いられるが、腐りやすいため実験後すぐに廃棄されてしまう。この廃棄量を減らすことは焼却処分の際に排出される温室効果ガス削減への貢献に加えて、使用される頻度が増えることでダイラタント流体の知名度向上、ひいては新材料としての注目度が高まることにつながると考える。

したがって、我々はこの水と片栗粉を用いたダイラタント流体(以下ダイラタント流体)の長期保存を本実験を最終目標とした。既存の研究では保存料である塩の添加によってダイラタント流体の腐敗抑制が可能であることがわかっている。²⁾しかし、保存料にも多く種類がある。そこで本研究では保存料を添加した際にダイラタント流体は性質を維持したまま長期的な保存が可能となると仮定した上で、ダイラタント流体の比較から、ダイラタント流体の特性を維持しながらも腐敗を抑制する期間(以下防腐期間)をより多い延長を可能とする保存料の特定およびその保存料の最適な添加量の特定を目的とした。本研究では市販で手軽に入手可能であった、塩、砂糖、クエン酸、アスコルビン酸(ビタミンC)の四種を保存料として用いた。

2 実験方法

ダイラタント流体作成

先行研究⁹⁾より水と片栗粉の質量比 1:1.3 のダイラタント流体を採用した。保存実験の際に容量 20ml のスクリー管を容器として用いる都合上、ダイラタント流体 1 サンプルの材料を水 5.5g 片栗粉 7.15g で、また混ぜ合わせる器具をビーカーとガラス棒に統一した。

ダイラタント流体保存

作成したダイラタント流体を調べる実験では、ダイラタント流体 1 サンプルそれぞれを容量 20ml のスクリー管に入れ密閉した状態で、インキュベーターを用いて 30℃の定温で保存した。

保存料添加

実験には入手が容易であった塩、砂糖、クエン酸、アスコルビン酸を保存料として用いた。(以下ダイラタント流体のサンプルをそれぞれ『「添加した保存料」のサンプル』例:塩のサンプル、無添加のサンプル)

また添加の際保存料の添加する割合を、水の質量(5.5g)に対する保存料の質量の割合とした。(例:水 5.5g に保存料 0.55g を添加した際、割合は 10%)

(単に保存料のはたらきを比較する際には、粒子の数を表すmolを添加量の単位としなければならないだろう。しかし、本実験では日常生活での使用を想定し、より少ない質量での添加を優位とする方が便利であると判断し、質量を表すgを添加量の単位とした。)

i)防腐期間比較

塩、砂糖、クエン酸、アスコルビン酸の4種の保存料 10%(0.55g)をそれぞれ添加したダイラタント流体 4 サンプルと、何も加えていないダイラタント流体 1 サンプルを作成した。その後、毎日においを確認し、腐敗しているかどうかを判断した。

それぞれのサンプルごとに、はじめて腐敗を確認するまでの日数(以下保存可能期間)を記録し

た。

ii)特性比較

i)と同様のダイラタント流体 5 サンプルをマイクロプレート(内径 40 mm、深さ 20 mm)にそれぞれ流し入れ、鉄球(直径 8 mm)を流体面の 200 mm 上からそれぞれのサンプルに落下させた。この落下時の様子を、ストップウォッチを後方に配置し、班員のスマホ(iPhone SE 第3世代)内蔵のスロー撮影機能で撮影した。(図1)スロー映像から鉄球が流体面に接触してから、流体内部に沈み鉄球の銀色が視認できなくなるまでの時間(以下特性時間)を記録した。

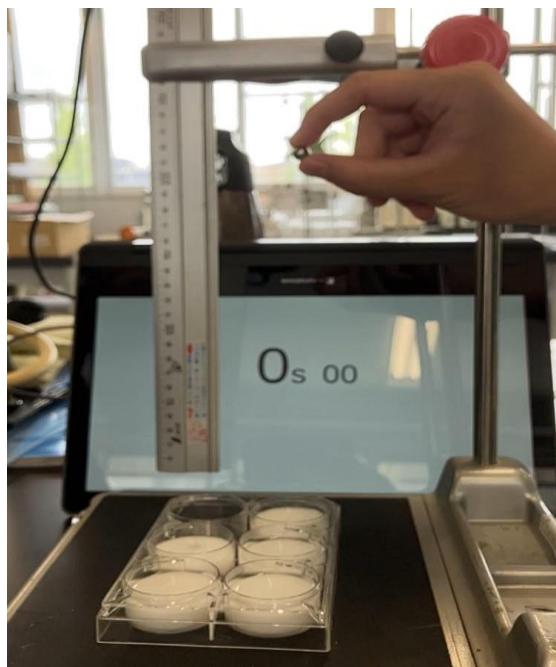


図1 ii)特性比較の実験の様子

3 実験結果

i)防腐期間比較

保存料の種類ごとの保存可能期間は表1のようになった。保存可能期間はクエン酸・アスコルビン酸のサンプルの70日以上で他3サンプルの10倍以上と著しく長かった。

保存料の種類	保存可能期間
無添加	5 日
塩	7 日
砂糖	2 日
クエン酸	70 日以上
アスコルビン酸	70 日以上

表 1 保存料の種類のサンプルごとの防腐期間

ii)特性比較

保存料の種類ごとの特性時間は表2のようになった。特性時間は無添加のサンプルは二番目の塩のサンプルの2倍と最も長かった。また、i)で著しい保存可能期間を示したアスコルビン酸のサンプルは、塩のサンプルに次いで3番目に特性時間が長く、クエン酸のサンプルの特性時間の1.5倍であった。

保存料の種類	特性時間
無添加	1.91 秒
塩	0.97 秒
砂糖	0.48 秒
クエン酸	0.56 秒
アスコルビン酸	0.84 秒

表 2 保存料の種類のサンプルごとの特性時間

4 実験考察

i)防腐期間比較

無添加に比べほとんどの保存料がより長い保存可能期間を示した。また、実験で腐敗を確認した日の前日まではダイラタント流体に対し保存料が防腐のはたらきをしていたと仮定すると、5つのサンプルの保存可能期間の順番は防腐期間の長さの順番に等しいといえる。よって、防腐期間はクエン酸とアスコルビン酸のサンプル、塩のサンプル、無添加のサンプル、砂糖のサンプルの順で長く、クエン酸・アスコルビン酸がより腐敗の抑制のはたらきをしていることを示した。

この要因として保存料それぞれの防腐メカニズムが関係していると考えた。塩や砂糖は溶液中または細菌内部の水分子と結合水を形成し、腐敗の原因となる細菌が増殖するのに必要な自由水が占める水分中の割合を減らすことで、防腐の抑制を行っている。⁴⁾対して、クエン酸は腐敗の原因となる細菌内部に侵入し、細菌に水素イオンを排出させること、およびpHの低下によって防腐の抑制を行う。⁵⁾また、アスコルビン酸は細菌の片栗粉粒子に対する酸化作用を自らが酸化されることによって防ぎ、防腐の抑制を行う。⁶⁾このクエン酸とアスコルビン酸の防腐メカニズムの共通点は、塩、砂糖とは異なりすべての粒子が防腐過程の始めに細菌に対して作用することである。(塩・砂糖は細菌内部の水だけでなく溶液中の水とも結合水を形成する。)これによって、クエン酸・アスコルビン酸の防腐期間が圧倒的に長かったと考えられる。

砂糖のサンプルが無添加のサンプルよりも短い保存可能期間を示したことにに関して、ごく少量であったため防腐効果を示さず、かえって細菌の餌となってしまったと考察した。一般的な保存料としての砂糖の必要量は質量パーセント濃度60%であり⁷⁾、本実験と照らし合わせると約19g(溶媒を水と片栗粉の混合物5.5g+7.15gとしたとき)が砂糖の添加量として必要になる。これは本実験で実際に添加した0.55gの約34倍と砂糖が保存料としてのはたらきを示すのに必要な量に到底足りない量であることを裏付ける。

ii)特性比較

特性時間はサンプルの流体が落下してきた鉄球の衝撃に反発し、落下を妨げる力の大きさを示すため特性時間は衝撃緩和特性を示すものととらえられる。無添加のサンプルが特性時間が最も長く、保存料の添加によってダイラタント流体の衝撃緩和特性は弱まることを示した。

この要因として mol が関係していると考察した。
理由として、4 種の保存料の mol は(mol 質量の逆数、かつ本実験の添加量は一定質量より)、大きい方から塩、アスコルビン酸、クエン酸、砂糖であり、ii)の特性時間の順番、長い方から無添加、塩、アスコルビン酸、クエン酸、砂糖に一致するからである。序論で述べたように、ダイラタント流体の特性はある特定の大きさの差に加えて粘度や密度をもつ 2 つの粒子の混ぜ合わせによって発生する現象ということが知られている。ここに第 3 の新たな粒子が加わると、この粒子による粒子の動きの阻害などから以前までの均衡が崩れてしまい、特性、特に衝撃緩和特性が弱化する結果となっていると考えられる。またこの考え方によって、粒子数が多くなるほどこの弱化の程度も大きくなっていることの説明ができる。

しかし、無添加のサンプルの特性時間は、2 番目、3 番目に特性時間が長かった塩とアスコルビン酸のサンプルの特性時間の 2 倍から 2.3 倍であった。この差は i)の結果のクエン酸・アスコルビン酸のサンプルと他三つのサンプルとの差よりも顕著ではなかった。そのため、i)でクエン酸とともに著しい防腐期間を示し、ii)でクエン酸よりも強い特性を示したアスコルビン酸を本実験で用いた 4 種の保存料の内、ダイラタント流体に最も適する保存料であると結論付けた。

5 追実験方法

iii)アスコルビン酸の防腐期間限界の検証

アスコルビン酸の添加量を 0%、2%、4%、6%、8%、10%と変えて 6 つのサンプルを作成し、i)と同様に保存、観察、記録を行った。

ダイラタント流体の限界

追実験では、添加量を変えたアスコルビン酸のサンプルの特性限界と、水と片栗粉の比率を変えた無添加のサンプルの特性限界とを比較することでアスコルビン酸の最適量の把握を目指した。ダイラタント流体は水の割合を増やすと液体の振る舞いに近づき、片栗粉の割合を増やすと固体の振る舞いに近づく。(このいずれにおいてもダイラタント流体の特性は弱化する。)保存料を添加するとダイラタント流体は液体の振る舞いに近づくため、水の割合を増やしていく方向で特性の限界を迎える水と片栗粉のダイラタント流体の比率を求めた。

水と片栗粉の質量比を本実験で用いた 1:1.3 から片栗粉の 1.3 を 0.02 ずつ 1.28、1.26、1.24 と 1.10 まで減らしていき、それぞれのサンプルで特性時間の計測および手の感触によってダイラタント流体とみなせるかの判断を行った。

総合的にサンプルを比較した結果、水と片栗粉の質量比 1:1.22 までがダイラタント流体の特性を維持しているといえると判断した。また、水の割合増加とともに減少し、質量比 1:1.22 での特性時間は 0.26 秒であった。

iv)アスコルビン酸の特性限界の検証

上記で示したように、特性時間が 0.26 秒までのサンプルをダイラタント流体の特性を示すものと判断できる限界の記録である。そこで、アスコルビン酸の添加量を変えてサンプルを作成し、ii)と同様に特性時間の計測、記録を特性時間が 0.26 秒を下回るサンプルを特定するまで行った。

6 追実験結果

iii)アスコルビン酸の防腐期間限界の検証

添加したアスコルビン酸の割合に対する保存可能期間は図 2 のようになった。添加の割合の値が大きければ大きいほど、長い保存可能期間を示した。

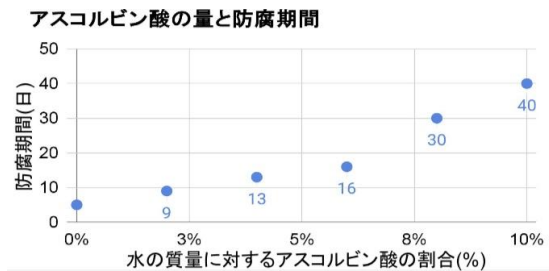


図2 アスコルビン酸の割合による保存可能期間

iv)アスコルビン酸の特性限界の検証

特性時間はアスコルビン酸の添加量が増えるとともに減少し、添加量がそれぞれ 20%のとき 0.27 秒、21%のとき 0.25 秒であった。よって、ダイラタント流体はアスコルビン酸を 20%～21%の割合までの添加では維持し、それ以上の添加ではダイラタント流体としての特性を失った。

7 追実験考察

iii)からアスコルビン酸の添加量を増やせば増やすほどダイラタント流体の保存可能期間すなはち防腐期間は長くなり、iv)からアスコルビン酸の添加の割合が 20%～21%まででダイラタント流体の特性が保たれる。そのため、水の質量に対して 20%から 21%の添加量がアスコルビン酸のダイラタント流体に対する最適とであると結論付けた。

8 展望・まとめ

本実験では少量のダイラタント流体をスクリー管で密閉していたため、保存するダイラタント流体やそれを入れる容器の違いによって本実験で得られた保存可能期間などとは差が生まれることが示唆される。そのため、より日常的に容易な保存方法での保存可能期間の測定などが求められる。

本実験をまとめると、用いた 4 種の保存料の内、アスコルビン酸がダイラタント流体に最適の保存料であり、水の質量に対して 20%から 21%の割合が最適とされる。

9 謝辞

本研究を進めるにあたり、ご助言をいただきました SSH コーディネーター石澤公明先生に深く

御礼申し上げます。また、快適な研究環境の提供に加えて多くのご指導、ご助言を頂きました仙台第三高等学校の松原啓先生をはじめとする教職員の皆様に感謝いたします。

参考文献

1)国立研究開発法人 物質・材料研究機構、”研究成果報告書 イオン液体を用いたダイラタンシー現象の衝撃緩和機構解明”、防衛省、2022-05.

https://www.mod.go.jp/atla/funding/hyouka/R3seika_13nims.pdf. (2024-06-15)

2)安田昂平、櫛延晃喜、郡司真志、大西健一郎、佐伯駿、柚山泰成、馬越佳和、高橋寛明(愛媛県大学附属高等学校)、“中高-06 ダイラタンシーの最適比率と保存法(中・高ポスター発表)”、CiNii Research、2014-08-23.

<https://cir.nii.ac.jp/crid/1543668945045710464>. (2024-06-30)

3)仙台第三高等学校 60 回生 理数科 2 班、“ダイラタンシーの活用”、2023 WEB 探求紹介、2023-11-06.

<https://drive.google.com/file/d/1HqHTJ2DUGemyQQurNbfodbkBVluKnkCE/view>. (2024-06-15)

4)山田千佳子、“なるほど豆知識 食品中の水の不思議:結合水”、nuas 名古屋学芸大学、2021-09-02.

<https://nutrition.nuas.ac.jp/tips/000068.html>. (参照 2024-08-11)

5)小磯博昭、“主要な保存料・日持向上剤の抗菌メカニズム—どこまで解明されているか?”、日本食品微生物学会雑誌、2024.

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsfm/31/2/31_70/_article/-char/ja/. (参照 2024-08-11)

6)村田晃、田代秀敏、川畑京子、堀江和生、清水美香子、加藤富民雄、神田康三、内藤大嗣、岩瀬正明、“アスコルビン酸の構造と殺菌活性の相関”、J-Stage、2008-06-02.

https://www.jstage.jst.go.jp/article/vso/83/2/83_KJ00005360596/_pdf/-char/ja. (参照 2024-08-11)

7)谷井潤郎、斎藤祥治、“似て非なるもの 塩と砂糖の不思議 Q&A <塩と砂糖の機能>”、公益財団法人塩事業センター、2010-12-02.

https://www.shiojigyo.com/institute/upload/papers_16_52-59.pdf. (参照 2024-08-11)