# 酢酸ナトリウムカイロにおける継続時間延長法

3－B 岡本幸樹

目次

第１章　序論
　1.1　本研究の背景
　1.2　本研究の目的と意義

第２章　酢酸ナトリウムカイロとは
　2.1　構造と仕組み
　2.3　過飽和現象とエンタルピー変化

第３章　実験方法
　3.1　実験材料と実験方法
　3.2　仮説とアプローチ
　　3.2.1　量的な調整
　　3.2.2　添加物の添加
　　3.2.3　装置の工夫
　3.3　実験条件

第４章　実験結果と背景の考察
　4.1　量的な調整
　4.2　添加物の添加
　4.3　装置の工夫

第５章　考察
　5.1　持続時間に影響を与える要因
　5.2　実用化に向けた評価

第６章　反省と展望
　6.1　本研究の反省点
　6.2　今後の研究への展望

第７章　結論

第８章　参考文献

## １．序論

### １）　本研究の背景

寒冷な環境下において体を温める手段としてカイロ(懐炉)が広く利用されている。また、カイロには様々な種類が存在し当時の時代背景や環境要因に伴って栄えたり廃れたりしてきた。特に「再利用可能カイロ」や「エコカイロ」として知られる“酢酸ナトリウムカイロ”(図１)は、加熱と冷却を繰り返すことで繰り返し使用できるうえ、温室効果ガスや環境廃棄物を出さない点が評価され SDGs が謳われ始めた頃から注目されてきた。このカイロは、過飽和状態の酢酸ナトリウム水溶液に刺激を与えると急激に結晶化し、その際の発熱によるもので過飽和現象と析出時のエンタルピー変化を利用している。

しかし、酢酸ナトリウムカイロは再生利用性や安全性の面で優れている一方で、その発熱の持続時間が比較的短いという欠点がある。これは屋外活動や災害時の防寒など長時間にわたる熱源を必要とする場面において不向きであり致命的な問題といえる。このため、酢酸ナトリウムカイロの発熱時間を延長する方法の開発は実用性を高めるうえで重要な課題である。



図１「selections」より

### ２）　本研究の目的と意義

先行研究では、カイロの形状、濃度、添加物、外部環境温度などが発熱特性に与える影響が示されているが、持続時間の延長に特化した研究は限られている。そこで本研究では、酢酸ナトリウム水溶液の濃度調整、添加物の検討、容器の構造や材質の違いなど、複数の要因が持続時間に与える影響の有無や度合いを系統的に調査することを目的とした。

本研究によって得られる知見は、単に持続時間の改善に寄与するだけでなく、相変化時の熱エネルギー利用の理解を深めるうえでも有用であり、物理化学的課題への応用的な意義も持つ。

## ２．酢酸ナトリウムカイロとは

### １）構造と仕組み

酢酸ナトリウムカイロは酢酸ナトリウム水溶液と金属板から構成されている。内容物が十分に冷えた(常温程度)際に金属板をはじくことにより、結晶化が進み同時に発熱する。またこれは酢酸ナトリウム水溶液が見せる過飽和という現象によるものである。そのため発熱が起こる期間は最初の結晶成長時のみであり永続的には起こらないため、継続時間が穏やかな酸化還元反応を用いたものに比べて短い傾向にある。

### ２）過飽和とエンタルピー変化

酢酸ナトリウム水溶液では過飽和という現象がよく見られる。これは溶質が十分に多い水溶液を静かに冷ましていくと、溶質が溶解度を超えても析出せず溶解し続ける現象である。それは溶液を静かに冷ますこ

とにより、核となるものが生成されず、結晶化がうまくできないことが要因である。しかしこの状態は非常に不安定で、核となるもの(溶質の結晶など)を加えると途端に結晶化が促進され、物の数秒で溶解度を超過して溶解していた溶質がすべて結晶化される。また、強い衝撃を加えることによりそのエネルギーで氷核と呼ばれる小さな結晶が衝撃を加えた点で作られることがあり、これが核となるものとして働く場合もある。一般に酢酸ナトリウムカイロは後者の衝撃を加える方式で結晶化を促進している。また、結晶化の際、溶質として存在していた状態の物質と結晶状態の物質とでは持っているエンタルピーが異なる（一般に固体状態の方が溶質として存在していた状態と比べ、エンタルピーは小さい）ので、発熱（または吸熱）が起こる。酢酸ナトリウムカイロでは。この発熱を利用して暖を取るといった仕組みである。

## ３．実験方法

### １）実験材料と実験方法

**＜実験試料、材料＞**

・酢酸 Na（無水）
・水
・トロミアップパーフェクト(増粘剤)
・パラフィンワックス
・食塩
・クエン酸 Na
・アルミ保温シート
・プラスチックコップ
・クーラーボックス
・温度計
・キッチンラップ

**<実験方法>**

（１）用意する試薬をプラスチックコップに入れる。
（２）キッチンラップと輪ゴムで(１)のプラスチックコップを密閉する。
（３）(２)を 80℃の水で内容物がすべて液体状になるまで加熱、攪拌する。
（４）十分に冷ました後、20℃のクーラーボックス内で、先に少量の酢酸 Na の結晶が付着した温度計を、ラップを突き破る形で差し込み反応を起こす。
（５）10 分ごとに温度を測定し、記録する

### ２）仮説とアプローチ

本問題を解決するにあたって本研究では大きく以下の三つのアプローチを試した

**2.1)量的な調整**

このアプローチでは濃度、分量がどの程度結果に影響するかについて調べる。濃度や分量が増加するとその分反応によって得られる析出量とそれに伴う熱量も増加するため、ブレイク時の温度が高くなり結果的に継続時間が延長されるのではと考えた。以下の実験①②③④が該当する。

**2.2）添加物の添加**

このアプローチでは添加物がどの程度結果に影響するかについて調べる。増粘剤や結晶毒となる添加物を加えることにより完全に結晶化するまでの時間が長くなりその分継続時間が延長されるのではと考えた。増粘剤としては市販のとろみ付剤である「トロミアップパーフェクト」を利用した。有効成分としては増粘多糖類のキタンサンガムである。以下の実験⑤が該当する。また、結晶毒として食塩とクエン酸 Na を利

用した。以下の実験⑥⑦が該当する。また、反応には関係のない物質を加えることにより溶熱量が増加し、継続時間が延長されるのではと考えた。その仮説の検証のため今回はグリセリンを加えて実験を行った。以下の実験⑧が該当する

**2.3）装置の工夫**

このアプローチでは装置を工夫することにより継続時間の延長を図る。二種類の方法を考えている。一つ目の方法ではパラフィンワックスに触れさせることにより、外部に放出される熱を、パラフィンワックスを熱する(融解させる)のに利用し、再びパラフィンワックスから熱を受け取ることにより継続時間が延長されるのではと考えた。以下の実験⑨が該当する。二つ目の方法ではアルミ保温シートなどの断熱材を用いることにより、放出される熱量を抑え、より継続時間が延長されるのではと考えた。以下の実験⑩が該当する。

**3）実験条件**

本研究では以下の①～⑩の十種類の条件で実験を行った。なお記載されている物質と分量は三章の１の＜実験方法＞(１)でプラスチックコップに入れる物質とその分量である。また今回は各 5 回ずつじっけんを行いそのデータの平均値を整数値で出した。

①酢酸 Na 40ｇ　水　40ｇ(基準)

②酢酸 Na 30ｇ　水　40ｇ

③酢酸 Na 50ｇ　水　40ｇ

④酢酸 Na 60ｇ　水　60ｇ

⑤酢酸 Na 40ｇ　水　40ｇ　トロミアップパーフェクト 0.5ｇ

⑥酢酸 Na 40ｇ　水　40ｇ　食塩　0.5ｇ

⑦酢酸 Na 40ｇ　水 40ｇ　クエン酸 Na 0.75ｇ

⑧酢酸 Na 40ｇ　水　40ｇ　グリセリン　15ｇ

⑨酢酸 Na 40ｇ　水　40ｇ（パラフィンワックス　30ｇの入った試験管を溶液に浸けた）

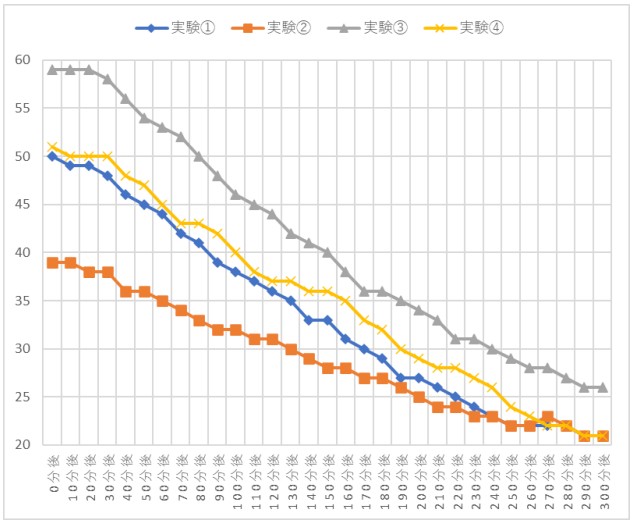
⑩酢酸 Na 40ｇ　水　40ｇ（アルミ保温シートをコップ状に切り巻き付けた）

## 4．実験結果と考察

**1）量的な調整による影響**

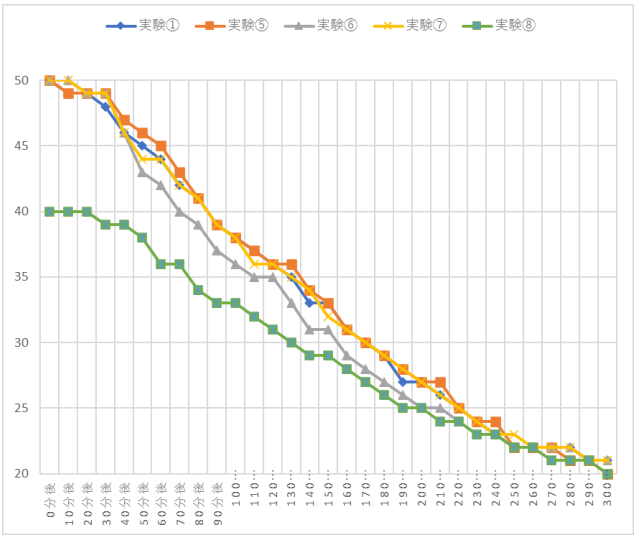
量的な調整による実験結果は以下の通りになった。

| ℃ | 0分後 | 10分後 | 20分後 | 30分後 | 40分後 | 50分後 | 60分後 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 実験① | 50 | 49 | 49 | 48 | 46 | 45 | 44 |
| 実験② | 39 | 39 | 38 | 38 | 36 | 36 | 35 |
| 実験③ | 59 | 59 | 59 | 58 | 56 | 54 | 53 |
| 実験④ | 51 | 50 | 50 | 50 | 48 | 47 | 45 |
| 70分後 | 80分後 | 90分後 | 100分後 | 110分後 | 120分後 | 130分後 | 140分後 |
| 42 | 41 | 39 | 38 | 37 | 36 | 35 | 33 |
| 34 | 33 | 32 | 32 | 31 | 31 | 30 | 29 |
| 52 | 50 | 48 | 46 | 45 | 44 | 42 | 41 |
| 43 | 43 | 42 | 40 | 38 | 37 | 37 | 36 |
| 150分後 | 160分後 | 170分後 | 180分後 | 190分後 | 200分後 | 210分後 | 220分後 |
| 33 | 31 | 30 | 29 | 27 | 27 | 26 | 25 |
| 28 | 28 | 27 | 27 | 26 | 25 | 24 | 24 |
| 40 | 38 | 36 | 36 | 35 | 34 | 33 | 31 |
| 36 | 35 | 33 | 32 | 30 | 29 | 28 | 28 |
| 230分後 | 240分後 | 250分後 | 260分後 | 270分後 | 280分後 | 290分後 | 300分後 |
| 24 | 23 | 22 | 22 | 22 | 22 | 21 | 21 |
| 23 | 23 | 22 | 22 | 23 | 22 | 21 | 21 |
| 31 | 30 | 29 | 28 | 28 | 27 | 26 | 26 |
| 27 | 26 | 24 | 23 | 22 | 22 | 21 | 21 |




| | 0分後 | 10分後 | 20分後 | 30分後 | 40分後 | 50分後 | 60分後 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 実験① | 50 | 49 | 49 | 48 | 46 | 45 | 44 |
| 実験⑤ | 50 | 49 | 49 | 49 | 47 | 46 | 45 |
| 実験⑥ | 50 | 50 | 49 | 49 | 46 | 43 | 42 |
| 実験⑦ | 50 | 50 | 49 | 49 | 46 | 44 | 44 |
| 実験⑧ | 40 | 40 | 40 | 39 | 39 | 38 | 36 |
| 70分後 | 80分後 | 90分後 | 100分後 | 110分後 | 120分後 | 130分後 | 140分後 |
| 42 | 41 | 39 | 38 | 37 | 36 | 35 | 33 |
| 43 | 41 | 39 | 38 | 37 | 36 | 36 | 34 |
| 40 | 39 | 37 | 36 | 35 | 35 | 33 | 31 |
| 42 | 41 | 39 | 38 | 36 | 36 | 35 | 34 |
| 36 | 34 | 33 | 33 | 32 | 31 | 30 | 29 |
| 150分後 | 160分後 | 170分後 | 180分後 | 190分後 | 200分後 | 210分後 | 220分後 |
| 33 | 31 | 30 | 29 | 27 | 27 | 26 | 25 |
| 33 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 27 | 25 |
| 31 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 25 | 24 |
| 32 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 |
| 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 25 | 24 | 24 |
| 230分後 | 240分後 | 250分後 | 260分後 | 270分後 | 280分後 | 290分後 | 300分後 |
| 24 | 23 | 22 | 22 | 22 | 22 | 21 | 21 |
| 24 | 24 | 22 | 22 | 22 | 21 | 21 | 20 |
| 23 | 23 | 22 | 22 | 22 | 22 | 21 | 21 |
| 24 | 23 | 23 | 22 | 22 | 22 | 21 | 21 |
| 23 | 23 | 22 | 22 | 21 | 21 | 21 | 20 |

以上のグラフより予想通り濃度が高いもの(実験③)は基準(実験②)に比べてブレイク時の温度が 10℃程高かった。それに伴い継続時間も終了を 30℃とすると 70 分ほど長くなっていた。また同様に濃度の低いもの(実験②)は基準(実験②)に比べてブレイク時の温度が 12℃程低かった。それに伴い継続時間も 40 分ほど短くなっていた。量を増やしたもの(実験④)に関してはブレイク時の温度は基準(実験①)と比べてほとんど差異はなかった。これは析出量が増え生成した熱量は大きくなったが水の分量も同時に増えたために水を熱するのに熱が使われたためだと思われる。また、基準(実験②)と比べて温度の低下が緩やかだったのは体積に比べて表面積が量を増やしたもの(実験④)の方が小さいためだと思われる。

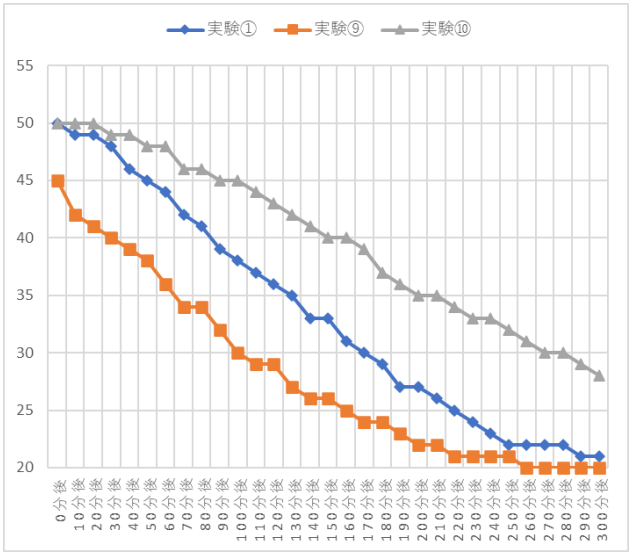



## 2）添加物の添加

添加物の添加による実験結果は以下の通りとなった。

以上の表、グラフより予想に反して増粘剤を加えたもの(実験⑤)とクエン酸 Na を加えたもの(実験⑦)は基準(実験①)に比べて大きな差異はなかった。このようなアプローチでは今回の方法だと結晶化の速度を

遅らせることはできないことが分かった。また食塩を加えたもの(実験⑥)は基準(実験①)と比べ温度減少が激しかった。これは食塩を加えたもの(実験⑥)と基準(②)間でブレイク時の温度や溶液の体積などにほとんど差異がなかったため食塩を加えたことにより溶液の熱輸送特性が変化したためと考えられる。原因としては自由なイオンが増えたことによって熱輸送の担い手が増え、熱輸送がより活発に行われたたことや、濃度勾配が複雑化したことによる局所的な密度差が増加して微弱な対流が起こりやすくなったことなどが考えられる。グリセリンを加えたもの(実験⑧)についてはブレイク時の温度が基準(実験①)と比べて 10℃程低かった。これは生成した熱がグリセリンの加熱に使われたためと思われる。しかし温度変化は基準と比べて緩やかだった。予想通り溶熱量の増加により温度減少を抑えることができたのではないかと考えられる。




### 3）容器の工夫

容器の工夫による実験結果は以下の通りとなった。

| | 0分後 | 10分後 | 20分後 | 30分後 | 40分後 | 50分後 | 60分後 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 実験① | 50 | 49 | 49 | 48 | 46 | 45 | 44 |
| 実験⑨ | 45 | 42 | 41 | 40 | 39 | 38 | 36 |
| 実験⑩ | 50 | 50 | 50 | 49 | 49 | 48 | 48 |
| 70分後 | 80分後 | 90分後 | 100分後 | 110分後 | 120分後 | 130分後 | 140分後 |
| 42 | 41 | 39 | 38 | 37 | 36 | 35 | 33 |
| 34 | 34 | 32 | 30 | 29 | 29 | 27 | 26 |
| 46 | 46 | 45 | 45 | 44 | 43 | 42 | 41 |
| 150分後 | 160分後 | 170分後 | 180分後 | 190分後 | 200分後 | 210分後 | 220分後 |
| 33 | 31 | 30 | 29 | 27 | 27 | 26 | 25 |
| 26 | 25 | 24 | 24 | 23 | 22 | 22 | 21 |
| 40 | 40 | 39 | 37 | 36 | 35 | 35 | 34 |
| 230分後 | 240分後 | 250分後 | 260分後 | 270分後 | 280分後 | 290分後 | 300分後 |
| 24 | 23 | 22 | 22 | 22 | 22 | 21 | 21 |
| 21 | 21 | 21 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| 33 | 33 | 32 | 31 | 30 | 30 | 29 | 28 |

以上のグラフからパラフィンワックスを用いたもの(実験⑨)は基準(実験①)と比べてブレイク時の温度が約 5℃低いことが分かった。これはパラフィンワックスを加熱するのに反応で生じた熱が使われたためと思われる。また温度減少に関して基準(実験①)と比べてグラフに傾きに差異がないことから溶液がいまひとつパラフィンワックスから熱を受け取れていないと考えられる。アルミの保温シートを使ったもの(実験⑩)に関して基準(実験①)と比べてブレイク時の温度は大差がないのに対し、温度変化が著しく緩やかである。これによりアルミの保温シートが放出される熱量を減らすように働いていたと考えられる。またそれにより継続時間も 30℃を終了と考えると約 100 分延長することができた。加えてこの時、外からの温度も簡易赤外線温度計を使って測定した結果十分に温度が高いことを確認した。

## ５．考察

### １）継続時間に影響を与える要因

以上の結果より継続時間に影響を与える要因について考察する。

はじめに量的な調整による影響について考える濃度は高ければ高いほどブレイク時の温度が高くなり、継続時間も長くなる傾向にある。また分量が多いほど温度減少が緩やかになり計測時間も長くなる傾向にある。このことから濃度と分量は継続時間に影響を与える要因であると考えられる。

次に添加物の添加による影響について考える。増粘剤や結晶毒などの添加により結晶生成に要する時間が長くなることを期待したが、本研究で行った実験では、通常のものとほとんど差異が見られなかった。また食塩など、添加する物質によってはかえって継続時間が短くなってしまう場合も確認できた。そのため現状、継続時間延長にはあまり期待できない。

次にアルミ保温シートを用いた方法について考える。アルミ保温シートを用いることにより温度減少をかなり抑えることができ、継続時間延長にとても効果的である。

最後に溶熱量を増やすことによるアプローチについて考える、本研究で行った実験では量が十分に多すぎたためか物質の加熱に必要な熱量が増えることでブレイク時の温度が低くなる傾向にあった。そのため溶熱量が増えることによる恩恵を受けにくいように感じた。しかし、グリセリンを加えたもの(実験⑦)については温度減少が穏やかになることが確認できたので今後の研究により有意に働く場合もあるかと思われる。

### ２）実用化に向けた評価

以下で各要因の実用化に向けた評価について考察する。

初めに濃度と分量についてだが、これは金銭的、技術的の両面に考えても実用的と考えられる。しかし、濃度が高くなれば高くなるほど過飽和の状態が不安定になる傾向があり、軽い衝撃などで意図しない形で結晶化が進んでしまう可能性がある。そのため実用化できるほど安定かつ持続時間が最大である分量について調べる必要がある。また、本研究と目的は異なるが、増粘剤を加えることにより、溶液がゼリー状になり、その形がより変形しにくくなることが分かった。それにより氷核ができにくくなることが予想できるため、過飽和状態でより安定になることが予想できる。それらも併せて考えることでより良い結果が得られることが期待できる。

次にアルミ保温シートを用いたものつまり断熱材を使うものについて考える。これも金銭的にも技術的にも実用的と考えられる。断熱材を使っているため外側に熱が伝わらないのではないかという懸念もあったが。予備実験より十分に温度が高いことが確認できているため問題はない。しかし、カイロ本体の見た目について、アルミ保温シートだと中身を遮ってしまっているため酢酸ナトリウムカイロの良い点の一つである結晶が成長するのが見れて面白いという点が失われてしまうため、カイロとしての機能はよくなるが面白さが半減してしまう。その点考慮が必要である。

その他添加物や溶熱量を増やすといったアプローチにつてだが、本実験では有意な影響を確認できなかったため、現状は実用

性については評価できない。

## ６．反省と今後の展望

### １）本研究の反省点

本研究では自身の知識不足や技術不足、時間不足も相まって種類や回数について多く実験を行えなかった。そのため添加物による影響や、溶熱量を増やすアプローチについての最適解などわからないことも多く出てきた。今後はこの課題を解決するためにより勉強し、多くの実験データが得られるよう研究を続けたい。

### ２）今後の展望

今後の展望としては、本研究で得られなかった添加物による影響についてより詳しく調べること。溶熱量を増やすアプローチについて、有意な結果を示すことができるのか、実用的な範囲に持っていくことができるのかについて調べること。濃度、分量の調節による実用的に利用できる安定性を持つ範囲でもっとも継続時間が長くなる最適解について調べること。透明でかつ空気中への余剰な放熱を減らすことができるアルミ保温シートに代わる断熱材としての材料を見つけることなどが挙げられる。

## ７．結論

本研究では酢酸 Na の過飽和現象を用いたカイロ通称「エコカイロ」の継続時間延長方法の模索を目的とした。その問題を解決するために大きく「量的な調整によるアプローチ」、「添加物の添加によるアプローチ」、「装置の工夫によるアプローチ」の三つの方法を考えた。その検証のために 10 種類の条件で実験を行い、濃度が高ければ高いほど継続時間が延長される傾向にあること。分量が多いほど継続時間が延長される傾向にあること。アルミ保温シートなどの断熱材は継続時間延長に効果的であることが分かった。同時に添加物が継続時間にどのような条件で影響を与えるのか、溶熱量を増やすアプローチは有効的なのか、濃度や分量の実用化を意識した最適解は何なのかなどわからないことも多く出てきた。これらについて調べることが今後の課題である。

## ８．参考文献


・慶伊 富長（2001）「反応速度論（第３版）」 東京化学同人

・田中 勝久（2019）「個体化学（第２版）」 東京化学同人

・宗像 鉄雄、永田眞一（2008）「酢酸ナトリウムさん水和物の過冷却状態からの凝固過程に関する研究」

・Mark Dannemand(2015)「Solidification behavior and thermal conductivity of bulk sodium acetate trihydrate composites with thickening agents and graphite」

・荒川 陽彩、杉江 葵、長谷川 雅人、横井 愛奈（2023）「過飽和溶液の濃度とブレイク時の上昇温度の関係」 https://www.hikonehg-h.shiga-ec.ed.jp/blog/wp-content/uploads/2023/02/707a49d21b9bca5abafbe23d5920c9aa.pdf

・阿部 愛笑、奥山 一穂、佐藤 萌（2022）「エコカイロについて」http://www.yuri-h.akita-pref.ed.jp/yuri-h-cms/assets/uploads/2022/03/2706-eco-kairo.pdf