

# ミネラルウォーターでムペンバ現象を引き起こす

石川県立金沢泉丘高等学校理数科

渡辺 良祐 笠間 栄伸 塩崎 和真 池村 彰矢 奥村 昂生

## 要旨

ムペンバ現象とはある特定の状況下で温水が冷水より早く凍結する現象のことである。本研究はムペンバ現象の原因を水の中に含まれる溶質であると考え、他のムペンバ現象に関する研究とは異なり、あえて、不純物を含む水で実験を行った。ミネラルウォーターで実験を行ったところ、80%の確率でムペンバ現象が見られた。

## 1. 研究背景・目的

ムペンバ現象とは「温水が冷水よりも早く凍る現象」である。1969年にタンザニアのエラスト・B・ムペンバ (Erasto B. Mpemba) はこの奇妙な現象についての論文を世界で初めて発表した。しかしそれから遙か昔、古代の科学者のアリストテレスやルネデカルト、フランシスコベーコンなどもムペンバ現象の存在を示唆していた可能性がある。ムペンバ現象が起こる原因として、過冷却現象、液体の対流、水面からの蒸発、液体中の溶質、など様々な仮説があげられる。しかし2020年の現在に至るまでムペンバ現象の理論は未だに解明されておらず、その存在を確実に示す研究もない。そこで、本研究の目的は、ムペンバ現象が現れる再現性のある状況を発見し、その原因、理論の解明に寄与することである。

## 2. 仮説

ムペンバ現象が未だ解明されていないその理由として、ムペンバ現象には再現性がないことがあげられる。どの先行研究も純水を用いて実験していたが、ほとんどムペンバ現象は見られなかった。我々は予備実験として純水と水道水を用いて実験を行った。その結果純水ではやはりムペンバ現象は一度も現れなかったが、水道水を用いた実験で一度だけム

ペンバ現象の観測に成功した。そこで、本研究では「水の溶質がムペンバ現象を引き起こす」という仮説を立てた。これまでの先行研究では純水が使用され、ほとんどの研究でムペンバ現象は再現性がないと結論づけられている。純水といってもその精製方法に決まりはなく、僅かながらでも不純物は含まれている。これがムペンバ現象の再現性に影響を与えているのではないかと考えた。他の研究の実験でムペンバ現象が殆ど現れないのは、水に含まれる不純物の量が制御できていないからではないかと考察した。この仮説を確かめるため、他の研究とは異なり、あえて不純物を加えた水で実験を行った。

## 3. 実験方法

使用した実験器具

- ・ 50ml ビーカー : 図 1
- ・ 熱電対温度計 (MAX31855) : 図 1
- ・ 10ml ホールピペット
- ・ 冷凍庫 (ナショナル電気冷蔵庫  
松下電器産業株式会社  
型番 : NR-80TA-GNational  
ドライパイプ方式)  
(空調設備の類はない)

一方は常温 (25℃~15℃)、もう一方は 100 度まで加熱し、(冷却開始時には 55℃~

70℃) 温度の異なる同じ種類の水をホールペレットで30mlをはかりとり、二つの50mlビーカーそれぞれ入れ、同時に冷凍庫の底面に直接並べて置き、その中心部の温度を熱電対温度計を用いて毎秒自動的に測定した。温度の測定には自作した測定機器(図3)を使用した。熱電対で測定した温度のデータをSDカードに自動で記録するようにエクセルを用いてプログラミングし、温度計を自作した。また、熱電対温度計の位置を揃えるための固定器具を3Dプリンターで作成したことで、各実験での温度計の位置をビーカーの中心、水面からの深さ1cmで固定した。本研究では容器中のすべての水が凍結することを凍結の基準とした。使用した冷凍庫の庫内温度は一定では無かったが(-10~-20℃)、2つのサンプルの初期温度を除き、両者の条件に違いはないと言える。様子は以下の通りである。

図1;自作した器具で熱電対温度計を固定したビーカー



図2;実験後の氷の様子(右:冷水 左:温水)

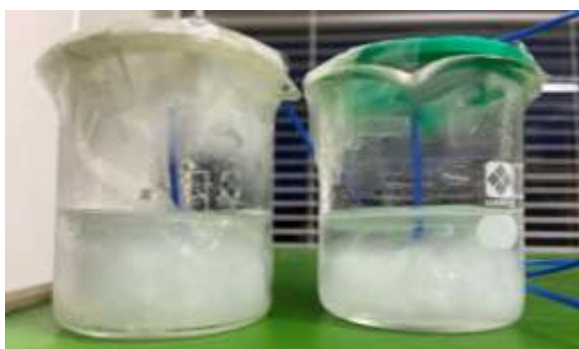
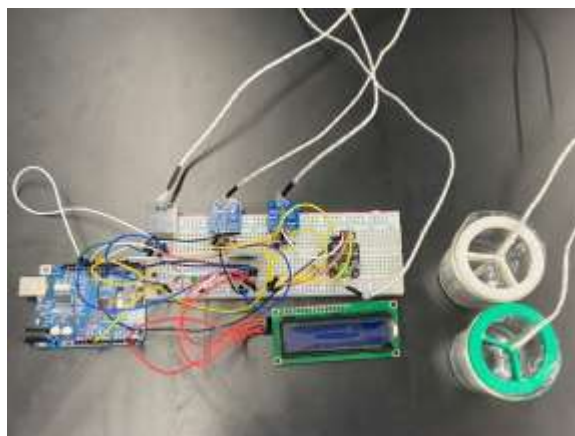


図3;自作した熱電対温度計



#### 4. 実験と結果

##### 凍るの定義

ムペンバ現象とは「温水が冷水よりも早く凍る現象」のことであるが、ムペンバ現象について議論するにあたり、まず「凍る」の定義を必要がある。我々は「凍る」を「容器内の水の完全凍結」と定義した。すなわち、縦軸が温度、横軸が時間を表すグラフにおいて、測定値が融点(0度)を下回った瞬間を「凍った」と定義した。

##### ムペンバ現象の定義

我々はムペンバ現象を観測するにあたり、グラフの直線区間の長さに着目した。直線区間とはグラフが融点(0度)で一定となっている区間のことである。我々はムペンバ現象を「温水の直線区間が冷水の直線区間よりも短い」と定義した。

以下のグラフは赤が温水、青が冷水を示すものとする

図4

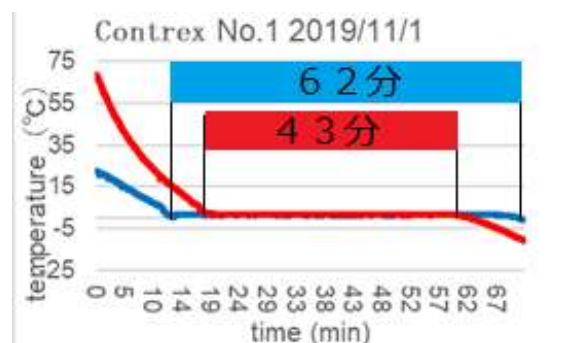


図4では温水が冷水よりも先に融点を下回っているため、温水が冷水よりも早く凍ったといえる。また直線区間の長さを比べても、冷水は62分であるのに対し温水は43分と短いのがわかる。よってこのグラフではムペンバ現象が起こったといえる。

図5

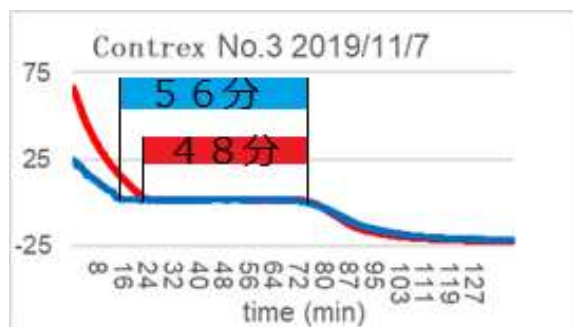


図5では図4と異なり温水と冷水が同時に融点を下回っているので、温水と冷水が同時に凍っているといえる。しかしグラフの直線区間の長さを比べると、冷水は56分であるのに対し温水は48分であるので、温水のほうが冷水よりも短いことが分かる。この場合温水が冷水よりも早く凍ってはいないが、30mLの水がすべて凍るのに要する時間は温水のほうが短いのでムペンバ現象が起こったといえる。

#### 4-1 実験と結果(1)

実験に使用した水

##### 1. ミネラルウォーター2種類

- ① Evian : 硬度 304mg/L  
(Ca:80mg/L, Mg: 26mg/L)
- ② Contrex : 硬度 1468mg/L  
(Ca:468mg/L, Mg:74mg/L, K:2.8mg/L)

図6 ; Evian(左) Contrex(右)



##### 2. 食塩水2種類

- ③ 濃度  $1.0 \times 10^4$  g/L  
(質量パーセント濃度 1.0%)
- ④ 濃度 25mg/L

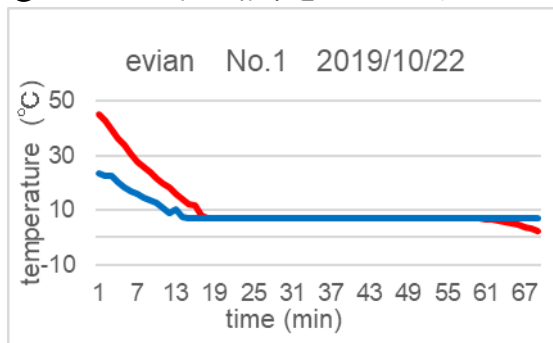
(モル濃度  $4.4 \times 10^{-4}$  mol/Lにし、Contrexと同じくらいのモル濃度になるように調整)

図7 ; 結果(1)

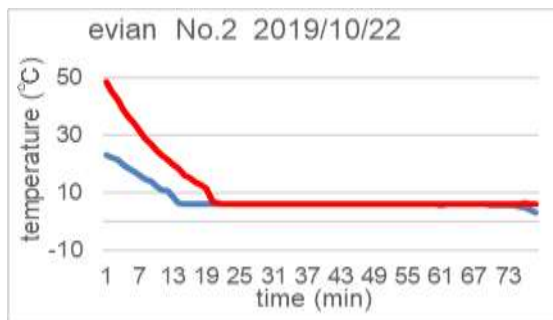
	①	②	③	④
試行回数	5	5	5	5
成功回数	4	5	3	4

図8 ; 実験結果①

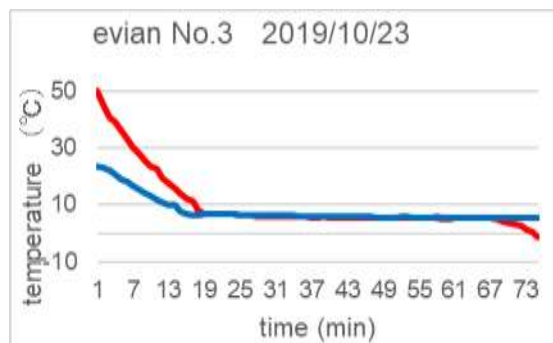
①Evian の5回の結果を以下のグラフで示す。



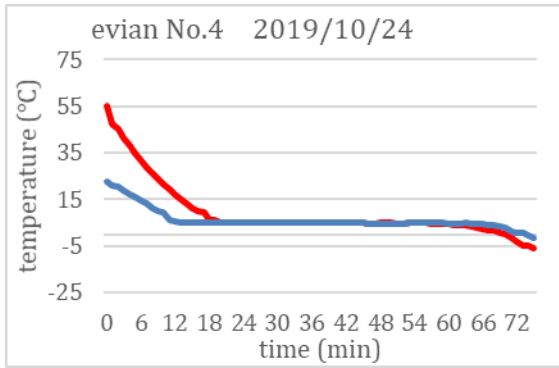
成功



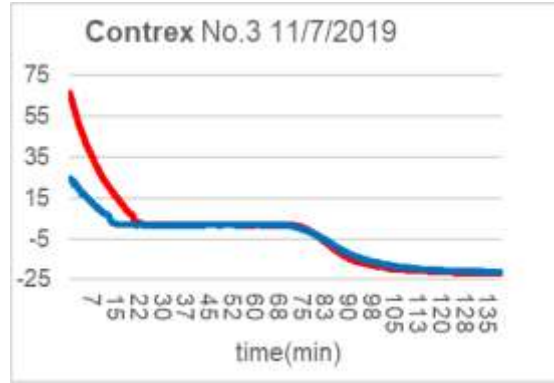
失敗



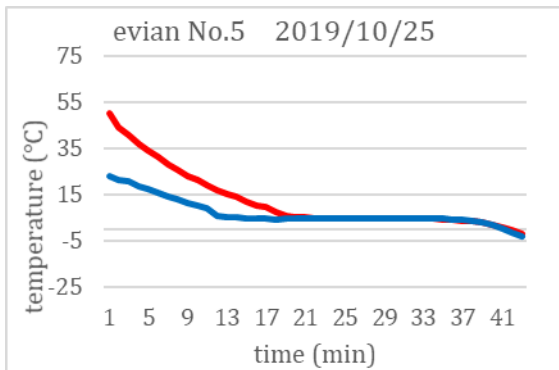
成功



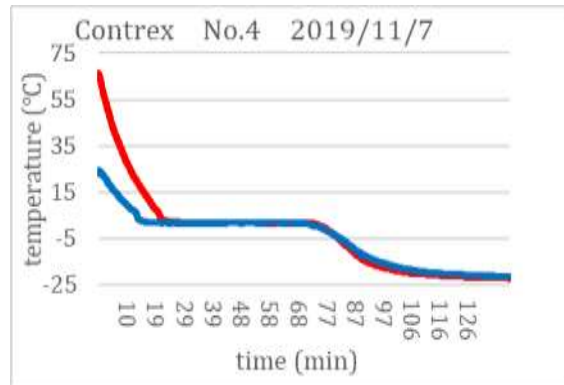
成功



成功



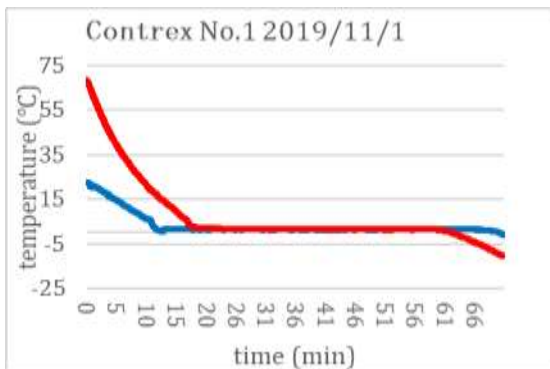
成功



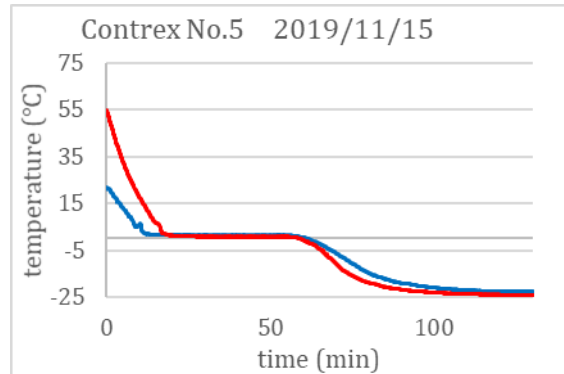
成功

図9；実験結果②

②Contrex の5回の実験 (No. 1～No. 5) の結果を以下のグラフで示す



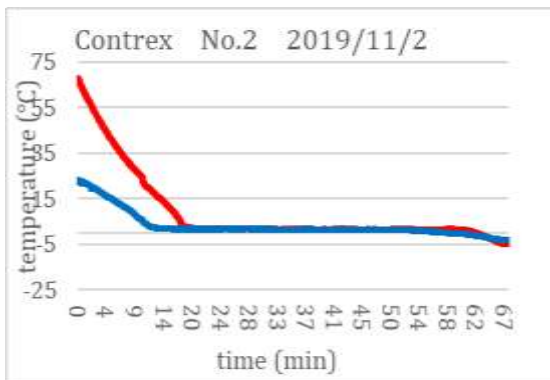
成功



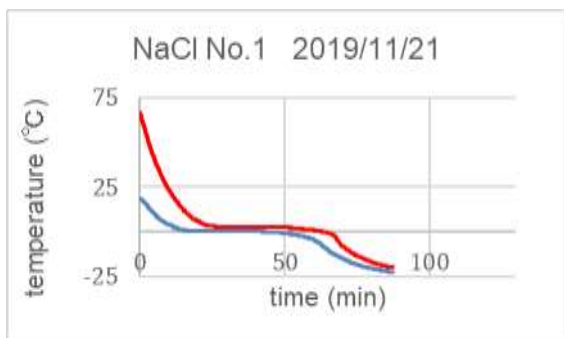
成功

図10；実験結果3

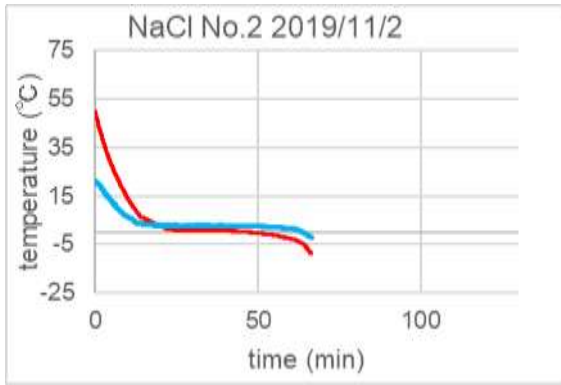
③食塩水  $1.0 \times 10^4 \text{mg/L}$  の5回の実験の結果を以下のグラフで示す



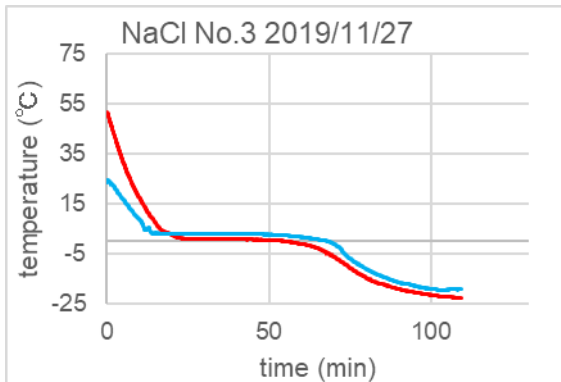
成功



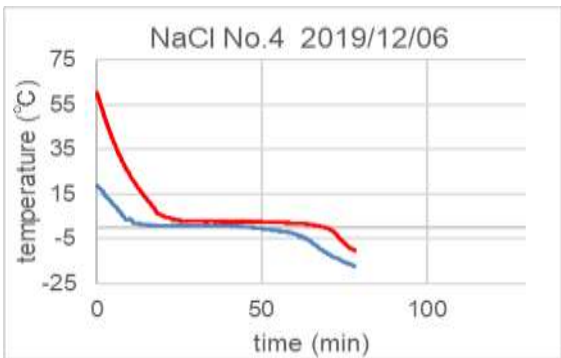
失敗 直線区間が温水のほうが長い



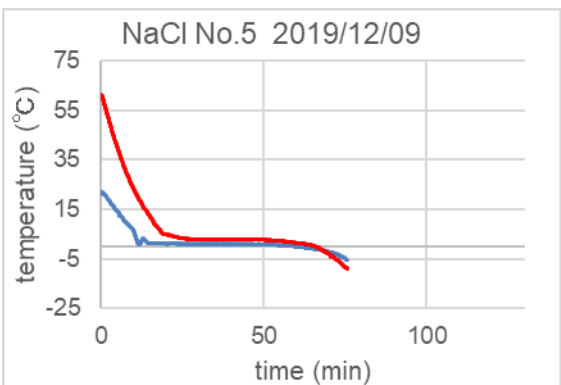
成功



成功



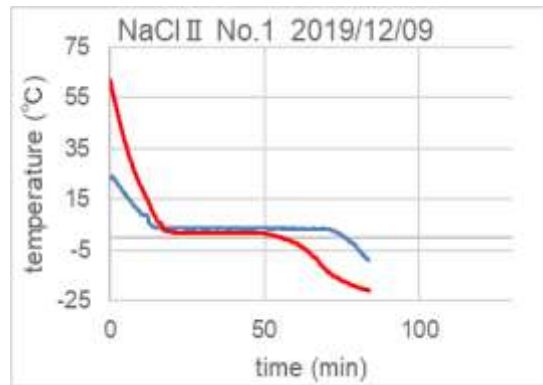
失敗



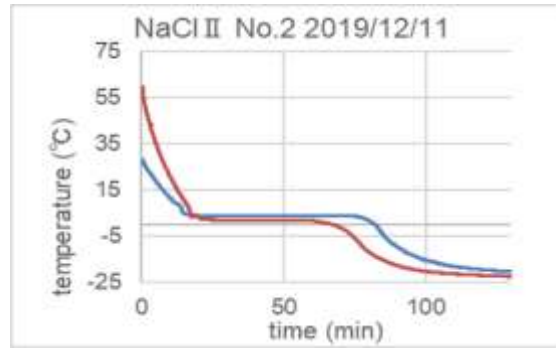
成功

図 1 1 ; 実験結果 4

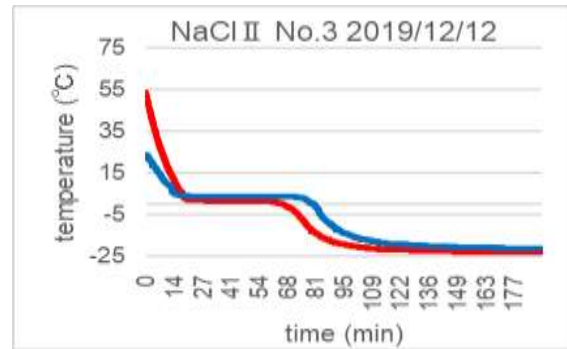
④食塩水 25mg/L の 5 回の実験結果  
を以下のグラフで示す



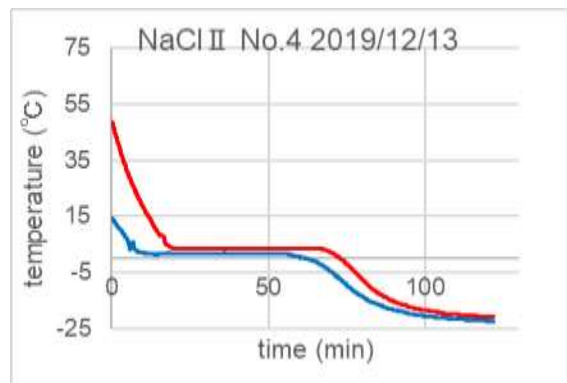
成功



成功

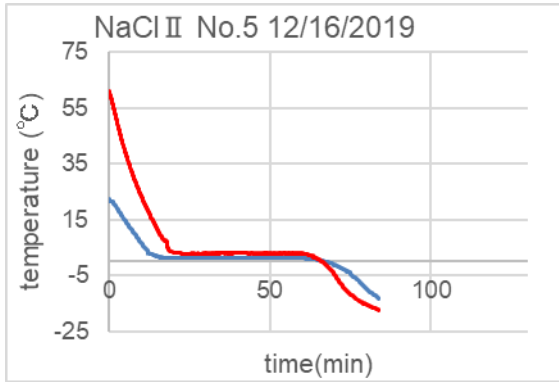


成功

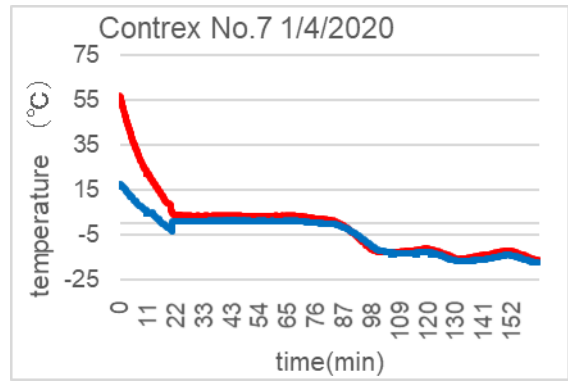


失敗





成功



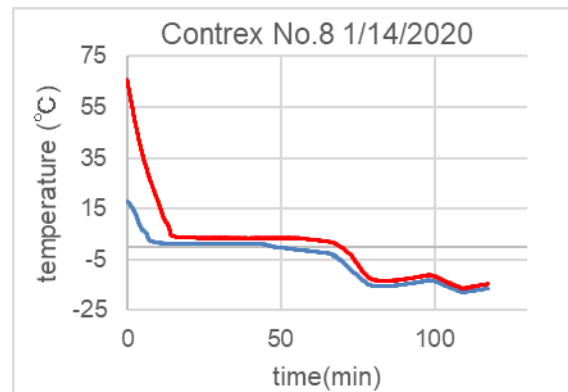
失敗

#### 4-2 実験と結果 (2)

結果(1)で最も成功率の高かった Contrex を用いて追加で25回の実験を行い成功率を調べた。

実験に使用した水

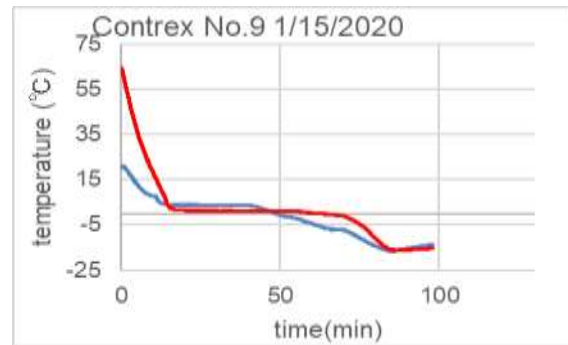
Contrex : 硬度 1468mg/L



失敗

図12 ; 結果 (2)

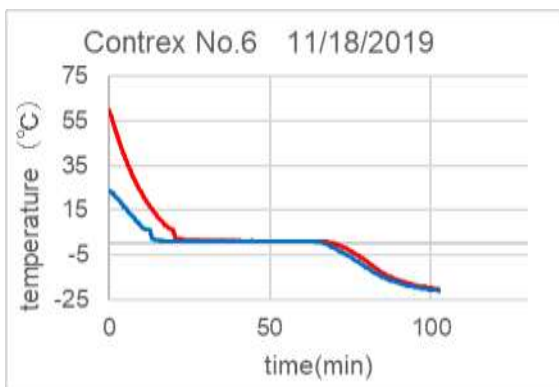
	Contrex
試行回数	25
成功回数	19



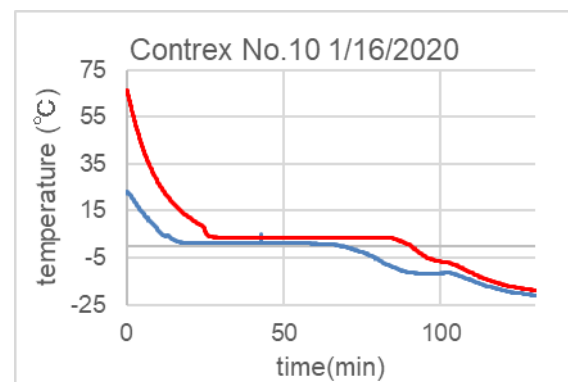
失敗

図13 ; 追加の実験結果

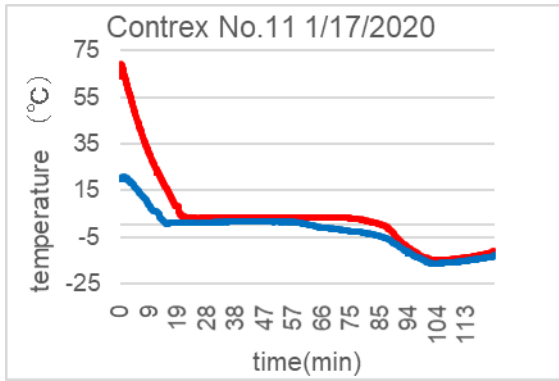
②Contrex を使って追加で行った25回の実験 (No. 6~No. 30) の結果を以下のグラフで示す



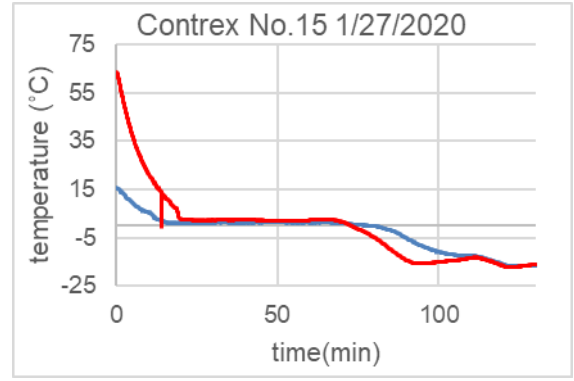
成功



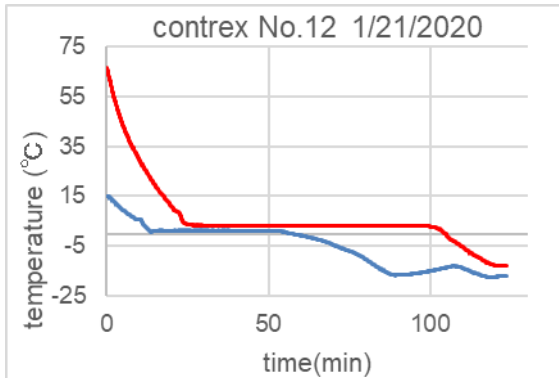
失敗



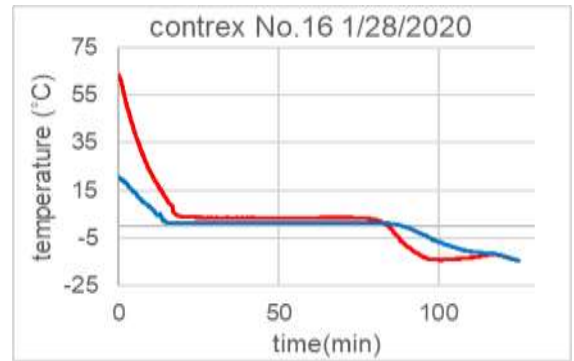
失敗



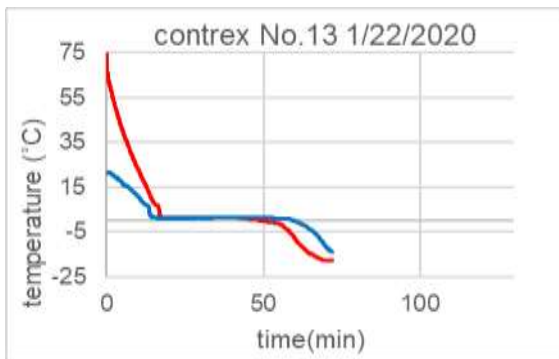
成功



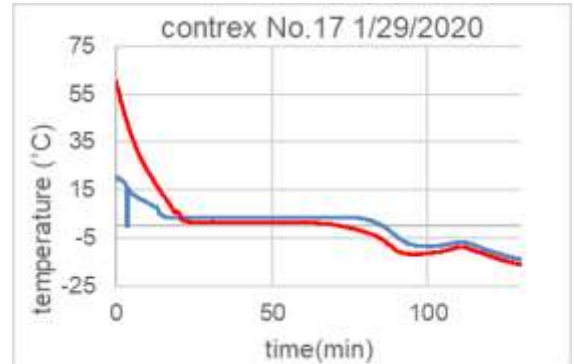
失敗



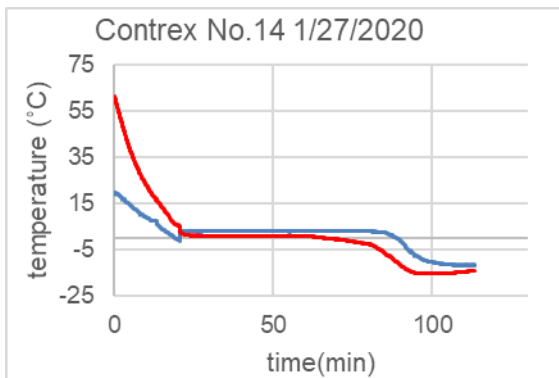
成功



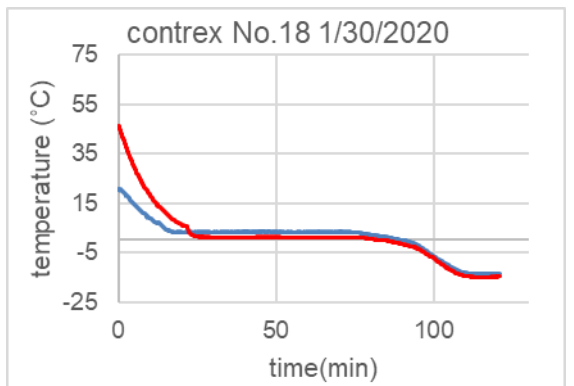
成功



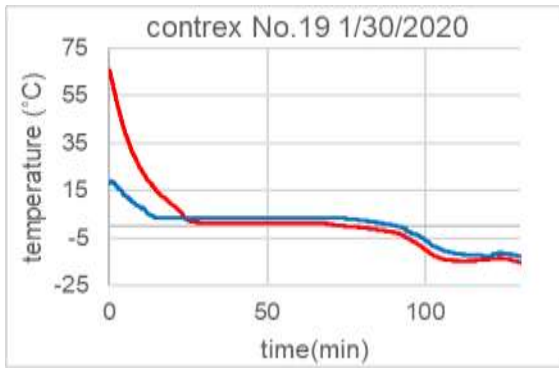
成功



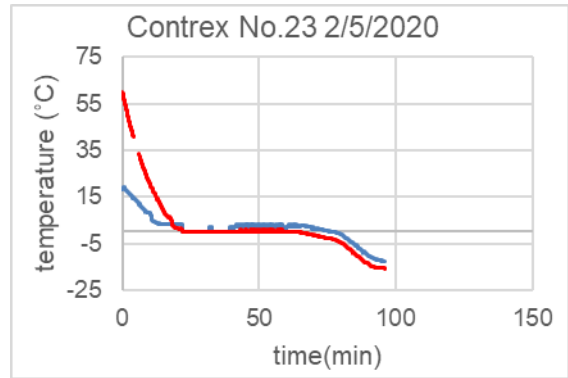
成功



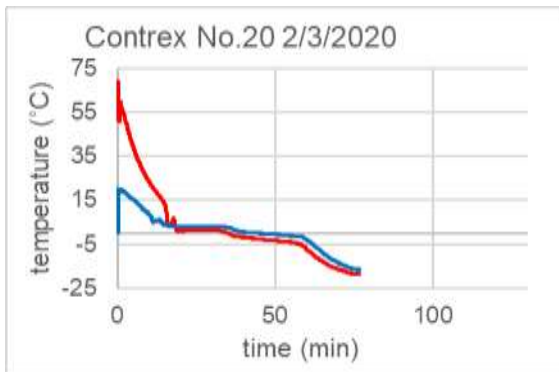
成功



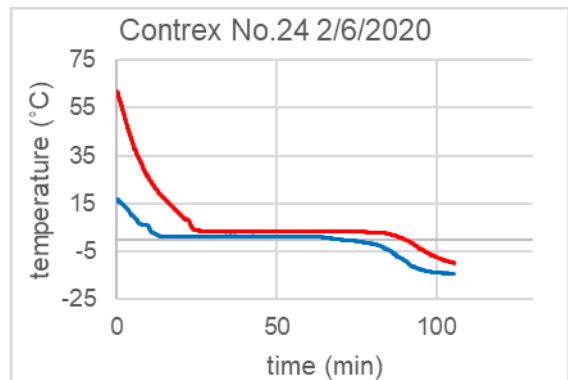
成功



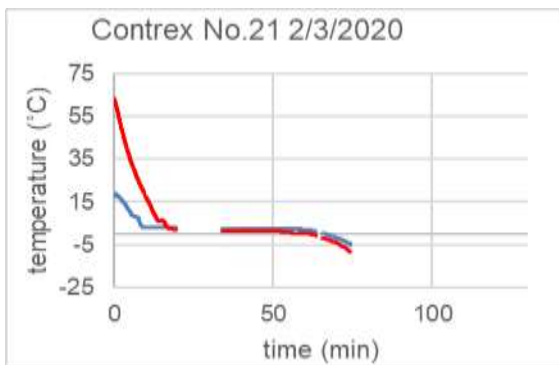
成功



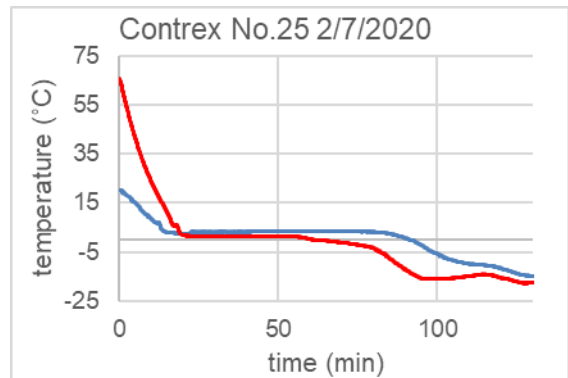
成功



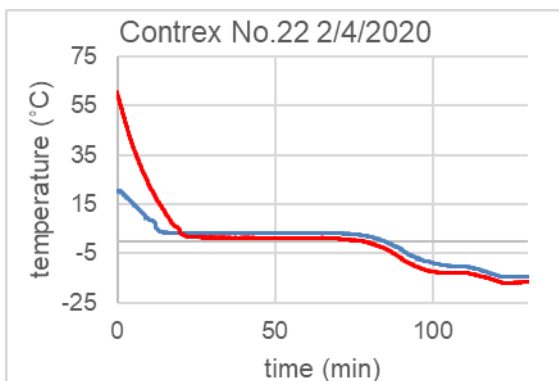
成功



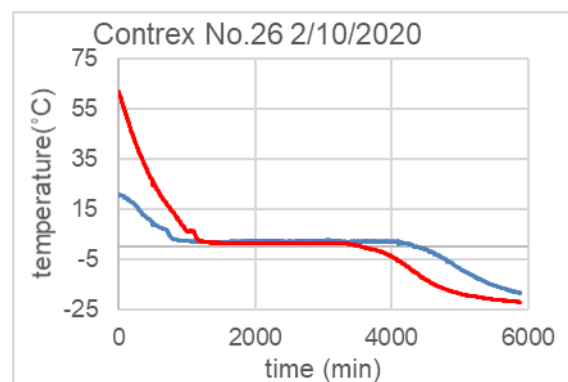
成功



成功

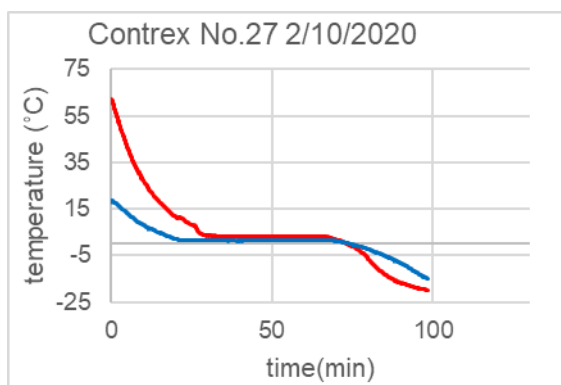


成功

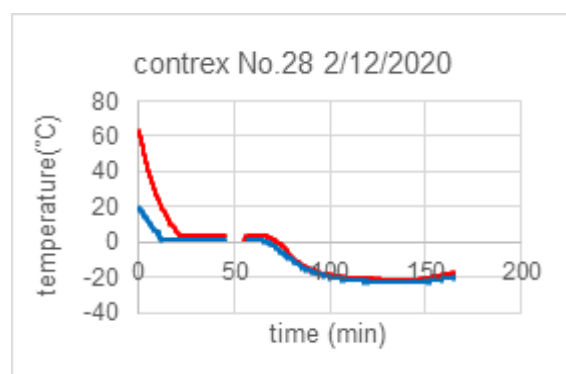


成功

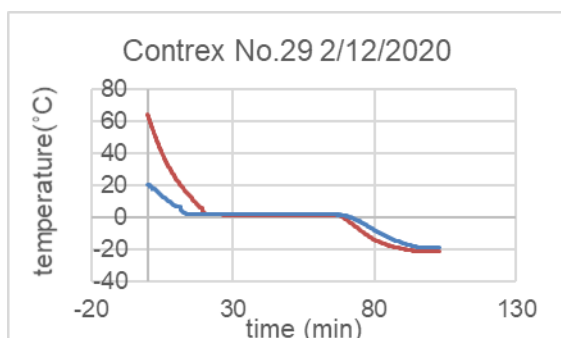




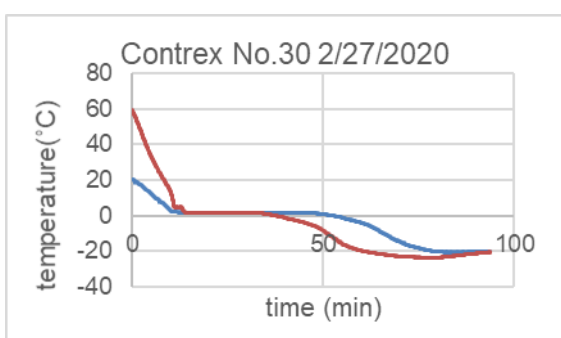
成功



成功



成功



成功

## 最終結果

	①	②	③	④
試行回数	5	30	5	5
成功回数	4	24	3	4

- ① Evian (304mg/L)
- ② Contrex(1468mg/L)
- ③ NaClaq( $1.0 \times 10^4$ mg/L)
- ④ NaClaq(25mg/L)

## 5. 考察

予備実験で行った純水を用いた実験ではムペンバ現象が見られなかったが、溶質（金属イオン）を含む水では80%の割合（最終結果②；30回中24回）でムペンバ現象が現れた。この結果から不純物がムペンバ現象を引き起こしたと言える。この実験では、溶質といってもイオンでしか実験を行っていないので、言い切ることはできないが、特に、イオンと水分子の電気的な結合によるエネルギー状態の変化がムペンバ現象の原因であると考えられる。水溶液中で水分子は金属イオンと水和しており、水溶液の温度が高ければ高いほど分子は大きく振動し、水分子とイオンの結合は弱まる。グラフの直線区間において、冷水は水分子とイオンの結合を断ち切りながら凍結するのにエネルギーを必要とするが、温水では水分子とイオンの結合が弱いため、凍結するとき水分子とイオンの結合を断ち切るために必要なエネルギーが冷水よりも少ない。この水分子とイオンの結合を断ち切るためのエネルギー量の差がムペンバ現象を引き起こしているのではないかと考えられる。過冷却現象、水面からの蒸発、対流、などによる説明ではなく、ミクロな視点でムペンバ現象を説明できるのではないだろうか。しかし、具体的な理論はできていない。

## 6. 今後の課題

今回と同じ条件で純水を用いて実験を行い溶質がムペンバ現象を引き起こしていることを確かめる。また、イオンでない不純物などでも実験を行い、更にムペンバ現象の原因を探る。さらに、行った実験を数値で比べ、定量化を行い、具体的な理論を作ることが理想的である。

## 7. 謝辞

北陸先端科学技術大学院大学 助教 小田和司 様  
北陸先端科学技術大学院大学 教授 水上卓 様

## 8. 参考文献

・ Mpemba paradox : Hydrogen bond memory and water-skin supersolidity

Chang Q Sun (Nanyang Technological University )

・ Questioning the Mpemba effect : hot water does not cool more quickly than cold

Henry C. Burridge , Paul F. Linden