

# PVA で迫る BR 反応の謎～指示薬デンプンの本当の役割～

静岡市立高等学校 科学探究科 3 年

青嶋妃菜 小田実来 木村日鞠 鶴見梨菜

## 1. 概要

Briggs-Rauscher (BR) 反応は  $I^-$  と  $I_2$  が繰り返し生成する振動反応であり、ヨウ素デンプン反応による黄色と青紫色が繰り返し現れるという特徴がある。この BR 反応において、指示薬として加えるデンプンが実は振動の継続に大きな役割を果たしていることはあまり知られていない。デンプンを加えると振動は 22 回、420 秒継続するのに対し、デンプンを加えない場合の振動は 12 回、90 秒にとどまるのだが、この件を記した論文は過去に一例<sup>1)</sup>しか無く、デンプンに注目した研究事例は見当たらない。

指示薬であるデンプンが BR 反応において果たす本当の役割を解明するために、本研究ではデンプンの代わりにポリビニルアルコール (PVA) を加える BR 反応を検討した。まず、PVA の構造的特徴とヨウ素呈色との関係を調査し、ヨウ素呈色を示す PVA は鹼化度が低く、デンプンと同様の螺旋構造をとっていると考察した。次に、デンプンの代わりに鹼化度の低い PVA を BR 反応に加えても、通常の BR 反応 (デンプンを加える BR 反応) と同様の振動が誘起されることを見出した。PVA を用いた振動の誘起は世界初の事例であり、この結果から、BR 反応におけるデンプンの本当の役割が単なる指示薬ではなく、実は螺旋骨格保有物質として振動の誘起に重要な役割を担っていることを明らかにした。

## 2. 研究背景

当初、スライムについて研究していた私達が、スライムの主成分である PVA がデンプンと同じように螺旋構造を形成してヨウ素呈色を示す<sup>2),3)</sup>ことを知った時、脳裏に浮かんだのは先輩方の BR 反応に関する研究であった。2018 年と 2020 年に本校で行われた課題研究において、先輩方は、BR 反応の振動の継続にはデンプンが必要<sup>4)</sup>であり、特にデンプンの直鎖螺旋構造が振動に関与する<sup>5)</sup>と話し、しかし一方で、デンプンが果たす役割についてはまだ解明されていないとも話していた。

デンプンの代わりに PVA を加えることで BR 反応の振動を誘起できれば、先輩方が達成できなかったデンプンの役割の解明につながる。PVA は、BR 反応におけるデンプンの役割を解明するのに最適な物質に成り得ることを確信した私達は、「螺旋骨格に反応物質が捕捉される過程が BR 反応の振動継続に必須」と仮説を立てた。この仮説が正しければ、デンプンの代わりに PVA を用いても BR 反応の振動が誘起されるはずである。しかし、スライム作成のために購入してあった市販の洗濯のり (主成分は PVA) をデンプンの代わりに用いて振動の発現を試みたが、予想に反し、何ら振動は観測されなかった。私達の仮説を検証するには、まず PVA の構造について理解を深める必要があった。

## 3. 研究目的

まず PVA の構造的特徴をヨウ素呈色と関連づけて検討し、次に、PVA を用いた BR 反応の振動発現を通して、BR 反応におけるデンプンの本当の役割を解明する。

## 4. 実験

### 4-1 PVA の構造的特徴とヨウ素呈色活性との関係

#### (1) 目的

PVA の鹼化度の違いがヨウ素呈色にどのような違いを生み出すのか検討する。

## (2) 方法

鹼化度と粘度、重合度の異なる8種類のPVAを用意した (Table 1)。各PVA ①~⑧水溶液 (3.7%) 5.0 mL にヨウ素液 (10 mmol/L) 200  $\mu$ L を加えてヨウ素呈色反応を観察し、吸収スペクトルを測定した。なお、スペクトルの測定には光路長が 1.0 cm のセル以外に 0.10 cm および 0.20 cm のセルも用いたが、Figs にあるスペクトルの Absorbance は、光路長が 1.0 cm のセルを用いた場合に換算して示している。

## (3) 結果

PVA①~③にヨウ素液を加えても、ヨウ素液と同じ色が現れるだけであり、そのチャート (Fig. 1) はヨウ素液のチャート (Fig. 2) と同じであった。よって、主にPVA①~③で見られた 290~360 nm のピークは、ヨウ素液中に遊離する  $I_3^-$  に由来すると判断した<sup>6)</sup>。

一方、PVA④~⑧にヨウ素液を加えると赤色を呈し、485nm 付近にピークが現れた (Fig. 1)。このチャートは、デンプン水溶液にヨウ素液を加えて測定したチャート (Fig. 2) と形が似ていたことから、PVA④~⑧で見られた 485 nm 付近のピークは、 $I_3^-$  がPVAの螺旋構造内に取り込まれた構造 (PVA $\supset$  $I_3^-$ ) に由来する吸収であると判断した<sup>7)</sup>。PVA $\supset$  $I_3^-$  が示す 485 nm の吸収強度はPVAの鹼化度によって変化し、鹼化度が低いほど吸光度が大きくなる傾向が見られたが、粘度や重合度による違いは見られなかった。

## (4) 考察

完全鹼化体であるPVA①~③はデンプンのような螺旋構造をとらないが、部分鹼化体であるPVA⑤~⑧はデンプンと同様の螺旋構造をとっていると考えられる。中間鹼化体のPVA④も 485 nm 付近にピークが観測されたが強度は弱く、螺旋構造が十分に形成されていないことが予想される。

Table 1 試薬 (Kuraray Poval<sup>TM</sup>)

No.	鹼化度 (mol%)	粘度 (mPa · s)	重合度	
①	98.0-99.0 (完全鹼化体)	高	3.2-3.8	300
②			25.0-31.0	1,700
③			54.0-66.0	2,400
④	95.5-96.5 (中間鹼化体)	中	24.0-30.0	1,700
⑤	87.0-89.0 (部分鹼化体)	低	3.2-3.6	300
⑥			27.0-33.0	2,400
⑦			40.0-48.0	2,400
⑧	79.0-81.0 (部分鹼化体)	超低	29.0-35.0	2,000

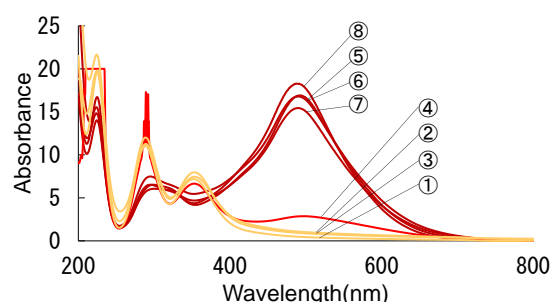


Fig. 1 PVA にヨウ素液を加えた水溶液の吸収スペクトル

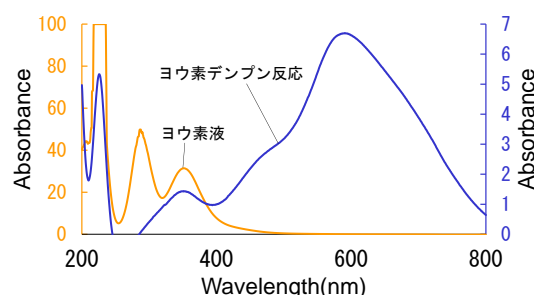


Fig. 2 ヨウ素液とヨウ素デンプン反応の吸収スペクトル

## 4-2 PVA にホウ酸を加えた場合のヨウ素呈色活性-1

### (1) 目的

PVAの螺旋骨格が、ホウ酸の添加により強固になる可能性を示唆した文献<sup>2),8)</sup>があったことから、PVAにホウ酸を加えた場合のヨウ素呈色について検討する。

### (2) 仮説

4-1でデンプンと同様の螺旋構造をとることが期待されたPVA④~⑧は、ホウ酸を加えるとその螺旋構造がより強固になり、Fig. 1に示す485nmのピークがより大きくなる。PVA①~③にホウ酸を加えてもPVAの構造に変化は起こらず、ヨウ素呈色も示さない。

### (3) 方法

PVA①~⑧水溶液 (3.7%) 5.0 mL に、ホウ酸水溶液 (4.0%) 1.0 mL、ヨウ素液 (10mmol/L) 200  $\mu$ L を順に加え、生じた沈殿物を 60  $^{\circ}$ C の湯浴で溶かし、氷冷した後に吸収スペクトルを測定した。

#### (4) 結果

PVA④～⑧は予想どおり赤色を呈色したが、PVA①～③は、予想に反して青色を呈色した。なお、PVA①、⑤を除くすべての試料に沈殿物が見られたため、①～⑧のすべての試料を湯浴すると沈殿物は溶解し、どの試料も黄色に変化した。これを氷冷すると、いずれの試料も湯浴前の色に戻ったが、PVA①～③については青色の程度が小さくなったように感じられた。

#### (5) 考察

得られたチャート (Fig. 3) を Fig. 1 と比較すると、PVA④～⑧のヨウ素呈色反応に基づく吸光度は小さくなり、むしろ  $PVA \rightarrow I_3^-$  構造の減少が示唆されたが、湯浴によってヨウ素が昇華してしまった可能性がある。青色に呈色した PVA①～③のチャートが、Fig. 1 とほとんど違いがなかったのは意外であった。しかしこれも、湯浴によるヨウ素の昇華が影響したと考えている。鹼化度の高い PVA①～③は、ホウ酸の添加によって  $PVA \rightarrow I_3^-$  とは異なる「何らかの PVA-ヨウ素複合体」を確かに形成したが、ヨウ素の昇華によって複合体が減少してしまったため、チャートにはその特徴が現れなかったのではないだろうか。実験方法を再考し、4-3で改めてこの青色溶液の吸収スペクトルを測定することにした。

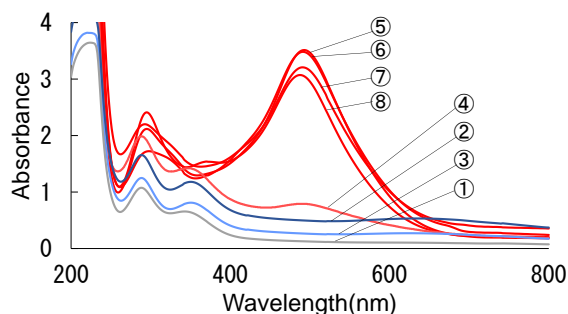


Fig. 3 PVA にホウ酸水溶液とヨウ素液を加えた水溶液の吸収スペクトル

### 4-3 PVA にホウ酸を加えた場合のヨウ素呈色活性-2

#### (1) 目的

鹼化度が高いPVA に多量のホウ酸を加えた場合のヨウ素呈色を調べ、PVA の構造について検討する。

#### (2) 仮説

鹼化度が高い PVA にホウ酸を加えると溶液は青色を呈し、4-2で考察した「何らかの PVA-ヨウ素複合体」が形成される。Fig. 1, 3 で観察された 485nm とは異なる波長にピークが現れ、ホウ酸の添加量を増やすと、「何らかの PVA-ヨウ素複合体」が徐々に強固になっていく。

#### (3) 方法

PVA①～③はいずれも同じ鹼化度であるため、この中で粘度が最も低くて扱いやすく、4-2においてホウ酸を添加しても沈殿物を生じなかった PVA①を選択して 3.7%水溶液を調整し、この水溶液 5.0 mL に、ホウ酸水溶液 (4.0%) 1.0 mL～9.0 mL、ヨウ素液 (10 mmol/L) 200  $\mu$ L を順に加えて吸収スペクトルを測定した。

#### (4) 結果

加えるホウ酸を増やしていくと、溶液の色は、ヨウ素液に由来する黄色から緑色を経て青色に変わった (Fig. 4)。Fig. 1, 3 で見られた 290～360 nm のピークは徐々に小さくなり、代わりに 650nm 付近にピークが現れた。

#### (5) 考察

4-1で、鹼化度が高い PVA は螺旋構造をとらないと考察したが、ホウ酸を多量に加えると確かに「何らかの PVA-ヨウ素複合体」が生じることがわかった。しかし、その構造は依然として不明であるため、知見を得るために、鹼化度が低い PVA についても同様の実験を行うことにした。

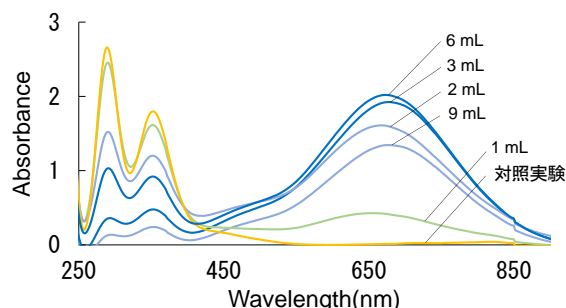


Fig. 4 PVA①に様々な量のホウ酸水溶液を加えた水溶液が示すヨウ素呈色の結果

### 4-4 PVA にホウ酸を加えた場合のヨウ素呈色活性-3

## (1) 目的

鹼化度が低いPVAに多量のホウ酸を加えてヨウ素呈色を調べ、PVAの構造について検討する。

## (2) 仮説

鹼化度が低いPVAにホウ酸を加えていくと溶液の赤色が徐々に濃くなり、Fig. 1, 3で観察された485nm付近のピークはさらに大きくなっていく。

## (3) 方法

4-2で赤色のヨウ素呈色を示したPVAの中で、最も粘度が低くて扱いやすく、ホウ酸を添加しても沈殿物を生じなかったPVA⑤を用いて3.7%水溶液を調整し、この5.0 mLに、ホウ酸水溶液(4.0%) 0.25 mL ~ 5.0 mL、ヨウ素液(10 mmol/L) 200  $\mu$ Lを順に加え、吸収スペクトルを測定した。

## (4) 結果

予想に反し、加えるホウ酸の量を増やしていくと、溶液の色が赤色、紫色を経て青色に変化した。ホウ酸の量が少ない時はFig. 1と同様のヨウ素呈色反応に基づくピークが485nm付近に見られたが、ホウ酸を増やしていくとこのピークは小さくなり、Fig. 4で見られたのと同じ650nm付近にピークが現れ、徐々に大きくなる様子が観察された。(Fig. 5)

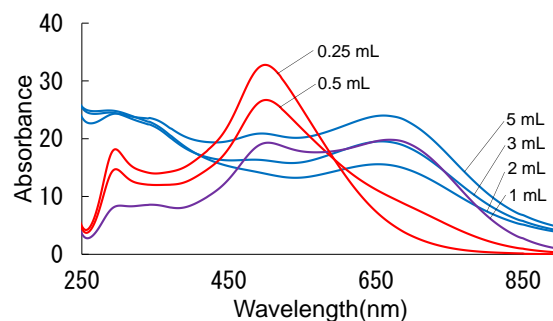


Fig. 5 PVA⑤に様々な量のホウ酸水溶液を加えた水溶液が示すヨウ素呈色の結果

## (5) 考察

鹼化度の低いPVAにホウ酸を添加していくと、ヨウ素呈色が簡単に赤色から青色に変わり、鹼化度の高いPVAにホウ酸を加えた場合のヨウ素呈色による青色に近づいていった。4-1で、PVAのヨウ素呈色による赤色溶液は $PVA \rightarrow I_3^-$ による螺旋構造が形成されたと考察し、4-3では、PVAにホウ酸を添加すると「何らかのPVA-ヨウ素複合体」が生じると考察したが、 $PVA \rightarrow I_3^-$ と「何らかのPVA-ヨウ素複合体」の構造には特に差異が無いことが予想された。

PVAとホウ酸による螺旋構造は、文献3)にFig. 6が紹介されている。Fig. 7のようにホウ酸と部分的に相互作用したPVAが、結果としてFig. 6に示す螺旋構造を形成すると予想するが、私達は、ホウ酸が少ない時はこの螺旋構造が短く、しかもPVAの一部にしか形成されない(Fig. 8)のに対し、ホウ酸を多量に加えると、ホウ酸の補助によって螺旋構造が伸長していくのではないかと予想した。

論文調査をすると、デンプンとヨウ素の複合体では、デンプンの螺旋が長くなるにつれて包接されるヨウ素種が変わり、吸収スペクトルのピークの位置が長波長側にシフトする傾向があることがわかった<sup>7)</sup>。この傾向をPVAに適応すると、Fig. 1, 3, 4, 5に見られた2種類のピーク(赤: 485nm、青: 650nm)について、485nm付近のピークはPVA内で $I_3^-$ と $I_3^-$ が緩やかに相互作用している状態を、650nm付近のピークは、PVA内で $I^- + (I-I \cdots I \cdots I-I)^- \rightleftharpoons 2I_3^-$ の平衡が左に偏っている状態を表していると解釈でき、ホウ酸の添加により、PVA-ヨウ素複合体を作る螺旋が徐々に長くなっていく様子を想像することができる。

この仮定に基づいてFig. 4と5の結果を改めて考察する。Fig. 4で用いたのは鹼化度の高いPVAである。ホウ酸が存在しない場合、PVAに存在する多くのヒドロキシ基による水素結合がPVA分子間に

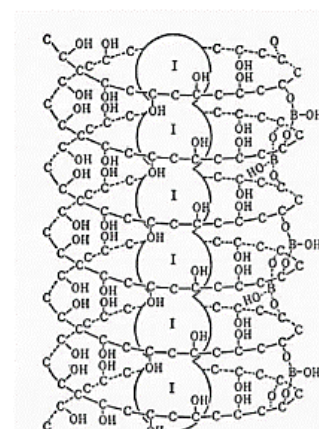


Fig. 6 PVAのらせん構造<sup>3)</sup>

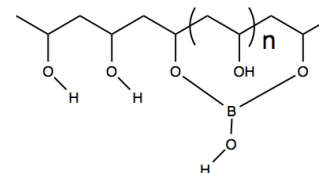


Fig. 7 PVAとホウ酸の相互作用



Fig. 8 PVAのらせん構造



まず生じてしまうだろう。螺旋構造は形成されず、ヨウ素を包接することもないため、醜化度の高い PVA だけではヨウ素呈色を示さなかったと説明できそう。しかし、ここにホウ酸が加わると分子内の一部にホウ酸-PVA による架橋構造 (Fig. 7) が生じて螺旋構造が形成され始め、さらにホウ酸を添加することによって、ある程度の長さを有する螺旋構造が一気に形成される。この様子が Fig. 4 に現れていると言えないだろうか。

Fig. 5 で用いたのは、適度な数のヒドロキシ基を有する醜化度が低い PVA であるため、ホウ酸の補助が無くても螺旋構造を形成できたと考えられる。しかしそれは部分的な螺旋構造 (Fig. 8) に過ぎず、ここにホウ酸が添加されることによって、最終的には Fig. 4 と同様の螺旋構造が形成される。Fig. 5 にはこの様子が現れているのではないかと考えている。

今回、PVA の立体構造を直接的に観測することはできなかったが、PVA-ヨウ素複合体の構造は基本的に螺旋構造であり、その長さの違いが呈色の違いに現れると私達は結論づけた。

#### 4-5 PVA を用いた BR 反応-1

##### (1) 目的

「醜化度が低い PVA は螺旋構造をとる」、「醜化度が高い PVA は螺旋構造をとらない」と 4-1 で導いた考察をもとに、螺旋構造の有無が BR 反応の振動に与える影響を PVA を用いて検討し、BR 反応におけるデンプンの本当の役割を考察する。

##### (2) 仮説

醜化度が低い PVA をデンプンの代わりに BR 反応に加えると振動が誘起されるが、醜化度が高い PVA を加えても振動は誘起されない。醜化度が低い PVA が振動を誘起すれば、BR 反応におけるデンプンの役割は単なる指示薬ではないことが証明される。

##### (3) BR 反応に用いる試薬および振動の測定方法

Table 2 BR 反応に用いた試薬

	試薬	濃度	体積
A	KIO <sub>3</sub>	0.20 mol/L	22 mL
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.054 mol/L	
B	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	3.80 mol/L	20 mL
C	CH <sub>2</sub> (COOH) <sub>2</sub>	0.15 mol/L	20 mL
	MnSO <sub>4</sub>	0.035 mol/L	
D	デンプン	1.0 %	2.0 mL
(D')	PVA①⑤⑧	3.7 %	

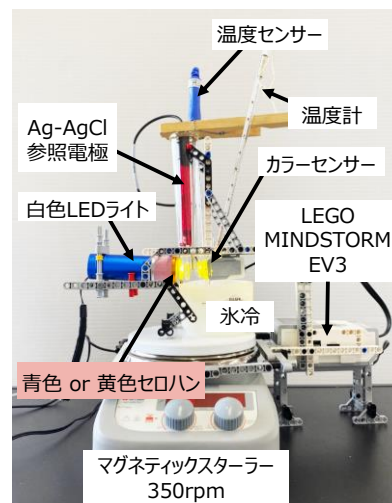


Fig. 9 BR 反応の測定装置

Fig. 9 に示す装置<sup>5)</sup>を組み、Table 2 に示す試薬<sup>9)</sup>を A、C、D (D') の順に試験管に加え、マグネティックスターラー (350 回転/分) で攪拌しながら B を加えた。なお、電圧の振動は Ag/AgCl 参照電極を用いてデータロガー (SPARK, 島津理化) で記録し、色の振動は、試験管の脇から白色 LED ライト (青色または黄色のセロハンを被せた) を照射して透過光をカラーセンサ (レゴマインドストーム EV3) で検知して、これを数値化した。

##### (4) 結果

Fig. 1 で螺旋骨格の形成が示唆された PVA⑤を添加すると、赤と黄色を繰り返す振動が 23 回、420 秒間続き

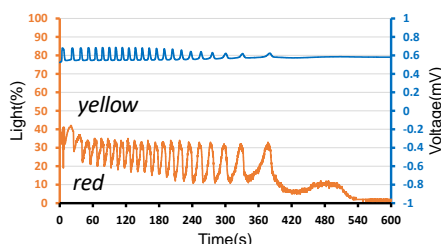


Fig. 10 PVA⑤を加えた場合

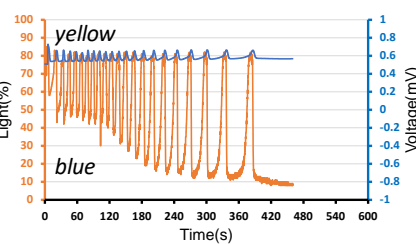


Fig. 11 デンプンを加えた場合 (基本の BR 反応)

(Fig. 10)、基本の BR 反応 (Fig. 11) とほぼ同じ結果が得られた (Table 3)。螺旋骨格を形成しないと予想した PVA①を加えた場合、やはり振動は継続せず (Fig. 12)、デンプンを加えずに行う BR 反応 (Fig. 13) と同様の結果が得られた (Table3)。

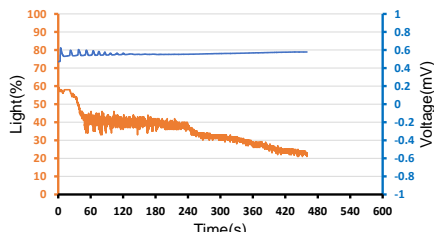


Fig. 12 PVA①を加えた場合

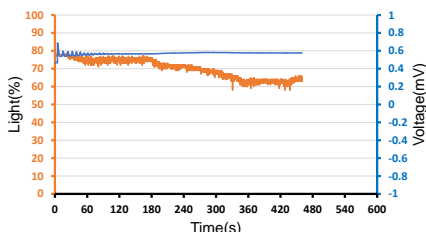


Fig. 13 デンプンを加えない場合

#### (5) 考察

PVA による BR 反応の振動誘起は世界で初めての実験例である。PVA⑤よりもさらに醜化度が低い PVA⑧でも振動が誘起される (Fig. 14) ことを確認した私達は、BR 反応におけるデンプンの本当の役割は単なる指示薬ではないことを世界で初めて証明したと言えるだろう。

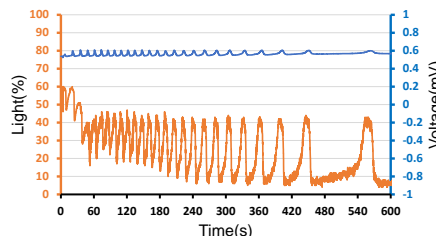


Fig. 14 PVA⑧を加えた場合

BR 反応の振動誘起には、“螺旋骨格をもつ水溶性高分子”の存在が不可欠であることが強く支持される。この条件を満たす物質であれば、デンプンでなくとも振動を誘起できることがわかった。BR 反応の系中に発生するヨウ素が螺旋骨格に包接される過程が振動の継続に不可欠であり、デンプンや PVA は系内のヨウ素の量を調整する役割を果たしているのではないかと考えている。

なお、この実験結果は BR 反応におけるデンプンの役割を明らかにしただけでなく、醜化度が低い PVA が、確かに螺旋構造をとっていることを同時に明らかにしたとも言えるだろう。醜化度の低い PVA が螺旋構造をとっていることを証明するために、次の実験を計画した。

Table 3 BR 反応の結果

指示薬	時間 (秒)	回数 (回)	振動の有無
デンプン	420	22	有
PVA⑤	420	23	有
PVA⑧	360	26	有
PVA①	120	10	無
無	90	12	無

### 4-6 PVA を用いた BR 反応-2

#### (1) 目的

本校の先行研究において、酸化還元活性指示薬であるフェリシアン化カリウムを基本の BR 反応 (Fig. 11) に加えると酸化還元反応が促進され、基本の BR 反応よりも振動時間が伸長し、さらに、基本の BR 反応とは異なる特徴的な形 (お椀型) の振動が現れることを確認している (Fig. 15) <sup>4)</sup>。デンプンの代わりに醜化度の低い PVA (螺旋構造ありと予想) を用いてこの反応を行い、デンプンの場合と同様の特徴的な振動が現れるか確認する。

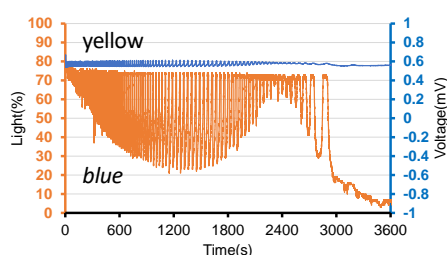


Fig. 15 デンプンとフェリシアン化カリウムを加えた時の振動

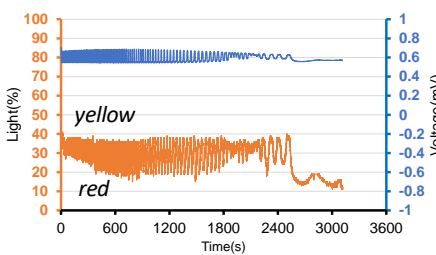


Fig. 16 PVA⑧とフェリシアン化カリウムを加えた時の振動

#### (2) 仮説

デンプンの代わりに醜化度の低い PVA を用いても、基本の BR 反応にフェリシアン化カリウムを加えた時に見られる振動の伸長と特徴的な形の振動が観察される。

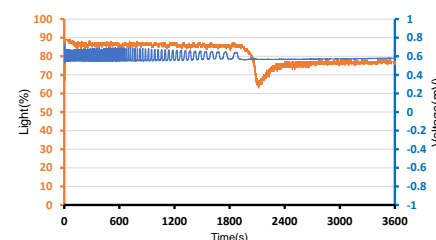


Fig. 17 フェリシアン化カリウムのみを加えた時の振動

### (3) 方法

Table 2 に示す試薬に、D' として 4-5 で螺旋構造をとることが確認された PVA⑧を用い、さらに、酸化還元活性指示薬であるフェリシアン化カリウム (5.0mmol/L) 200  $\mu$ L を加えて振動を測定した。デンプンを用いる通常の BR 反応にフェリシアン化カリウムを加えた場合と、デンプンや PVA を加えず、フェリシアン化カリウムのみを加えた場合についても同様に振動を測定した。

### (4) 結果

PVA⑧にフェリシアン化カリウムを加えると、デンプンの場合と同様に振動が伸長し、特徴的なお椀型の振動が現れた (Fig. 16, Table 4)。

Table 4 フェリシアン化カリウムを用いた BR 反応の結果

指示薬	時間 (分)	回数 (回)	形
PVA⑧	42	95	お椀型
デンプン	48	95	お椀型
無	35	82	—

### (5) 考察

PVA⑧を用いてもデンプンを用いた場合と同様の特徴的な振動が現れたことから、やはり、PVA⑧のような鹼化度の低いPVAはデンプンと同様の螺旋構造をとっていると言えるだろう。

## 4-7 PVA を用いた BR 反応-3

### (1) 目的

4-3において、鹼化度が高いPVAでもホウ酸を大量に加えれば螺旋構造を形成すると考察したことから、この青色溶液をBR反応に添加しても振動が誘起されるかどうか確かめる。

### (2) 仮説

ホウ酸を添加して強制的に螺旋構造を形成させたPVAであってもBR反応の振動を誘起することができる。

### (3) 方法

Table 2 に示す試薬に、D' として PVA①水溶液 (3.7%) 1.0 mL にホウ酸水溶液 (4.0%) 1.0 mL を添加した青色水溶液を加えて BR 反応の振動を測定した。

### (4) 結果

振動は継続せず (Fig. 18)、Fig. 13 と同様の結果が得られた。

### (5) 考察

予想に反して振動は継続しなかった。試しに、PVA①にホウ酸水溶液を加えた青色の溶液に、Table 2 に示す試薬 A, B, C を一種類ずつ加えてみたところ、どの試薬を添加しても一瞬で青色が消えてしまった。PVA-ホウ酸による青色溶液を添加しても振動が継続しなかったのは、その螺旋構造に問題があったからではなく、

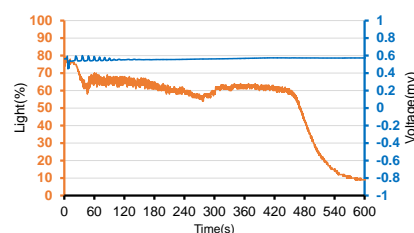


Fig. 18 PVA①とホウ酸水溶液を加えた時の振動

Table 2 に示す試薬 A, B, C が PVA-ホウ酸による螺旋構造を破壊してしまったからだと考えている。

## 5. 結論

まず、鹼化度や粘度が異なる様々なPVAを用いてヨウ素呈色反応の発現を検討した。鹼化度の低いPVAは螺旋骨格を形成し、PVA-ヨウ素複合体が示す赤色を呈色するが、鹼化度の高いPVAは螺旋骨格を形成せず、ヨウ素呈色も示さないことがわかった。しかしこれらにホウ酸水溶液を加えていくと、どんな鹼化度のPVAであっても最終的には青色を呈し、PVA-ヨウ素複合体の螺旋骨格が伸長していく様子が示唆された。

また、螺旋骨格を形成することが確認された鹼化度の低いPVAを用いて、BR反応の振動を誘起させることに世界で初めて成功した。この結果は、BR反応におけるデンプンの本当の働きは単なる指示薬ではなく、系中に発生するヨウ素の量を調節する包接化合物として重要な役割を担っていることを明

らかにした。

## 6. 今後の展望

まず、PVA の構造を直接的に観察する方法を検討して PVA の螺旋構造を証明したい。pH を調整しながら PVA-ホウ酸による螺旋構造の変化を追跡する研究にも興味がある。PVA やデンプンの包接化合物としての可能性を探り、いずれは薬学や医学に応用させる研究に取り組みたい。

## 7. 謝辞

分光スペクトルの測定に便宜を図って下さった静岡大学理学部 近藤 満 先生、PVA について御教示くださった静岡理工科大学工学部 小土橋 陽平 先生、PVA を提供頂いた (株) クラレに深く感謝します。

## 8. 参考文献

- 1) 福永勝則, 化学と教育, 日本化学会 1988, 36, 296
- 2) 岡田隆之介, 第 15 回科学の芽, <https://www.tsukuba.ac.jp/community/students-kagakunome/shyo-list/pdf/2020/j6.pdf> (最終閲覧日 2022 年 8 月 17 日)
- 3) 竹本喜一 (1978) 「包接化合物の化学」東京化学同人 p. 79~81
- 4) 袴田彩仁他, 静岡県小・中・高等学校児童生徒 理科研究発表論文集, 2019 年版 高校生の部 p. 1 <https://gakusyu.shizuoka-c.ed.jp/science/sonota/ronnbunshu/top.htm> (最終閲覧日 2022 年 8 月 17 日)
- 5) 加藤善大他, 静岡県理科研究論文集, 令和 3 年度 <https://gakusyu.shizuoka-c.ed.jp/science/sonota/ronnbunshu/top.htm> (最終閲覧日 2022 年 8 月 17 日)
- 6) 矢島博文, 化学と教育, 日本化学会 2015, 63, 228
- 7) 田仲 二郎, 化学教育, 日本化学会 1980, 28, 257
- 8) M. M. ZWICK, J. Appl. Polym., 1965, 9, pp. 2393-2424
- 9) [物理屋さん] 山本屋本舗 <http://yamamoto-akira.org/butsuriya/BRshindou/> (最終閲覧日 2022 年 6 月 17 日)