

備長炭電極を用いた安全な電気パン実験

津田 裕也¹ 鈴木 昇¹

Safe electric bread using a carbon electrode

Yuya TSUDA¹, Noboru SUZUKI²

The bread baked by Joule heat using electricity is called electric bread. This experiment is often made as a scientific experience class and an experimental training as an educational experiment. But a metallic electrode causes electrolyzing during turning on. Electrolyzed electric pan contains oxides. Many absorption of oxide is harmful in a human body. We made an experiment using a electrode of the charcoal which doesn't cause electrolyzing to settle this problem. Even a electrode of charcoal could bake bread, and the way to make an electric bread experiment more safely was established by this.

キーワード：電気パン, ジュール熱, 炭素電極, 電気分解

Keywords : electric bread, joule heat, carbon electrode, electrolysis

1. はじめに

この研究ノートは 2015 年度に明星大学夏休み科学体験教室で行った、「電気パンをつくろう」の内容を元にまとめたものである。

電気パン実験は焼き上げたパンを食べられるということや、ジュール熱や電気抵抗などの理解、また装置が簡単に作成できることから、たびたび実験実習や科学体験教室のテーマとして取り上げられる。

しかしながら、この電気パン実験は生地に電気を流してパンを焼き上げる際に、金属でできた電極が電気分解により酸化膜をつくり、その酸化物がパンに混入してしまうという問題点がある。

この問題点は食の安全が強く求められる昨今では深刻であり、自分達で作ったものが食べられるということが大きな魅力である電気パン実験には致命的であった。

そこで本実験を明星大学夏休み科学体験教室で行うにあたって、電気分解を起こすことがない炭を使った電極を作成し、酸化物が混入しない安全な電気パンを焼き上げる方法を検討し、実践を行い、本研究ノートによって確立した。

本研究ノートでは、まずこれまで行われてきたポピュラーな電気パン実験の方法と装置について解説し、その問題点について論じる。そして、問題点を回避するために作成した装置について解説し、実験方法と結果についてまとめ、それらを考察する。

2. 電気パン実験について

一般家庭にも使用されている 100V の交流電圧を用いて、ホットケーキミックスと水を混ぜた生地に電気を流すと、ジュール熱により材料が温まり、パンが焼きあがる。この実験は「電気パンの実験」として知られ、科学体験教室や学生実験実習でよく取り上げられる。また、過去にセンター試験の問題にも採用されている。

2-1 これまでの電気パンの実験装置

もっとも手軽な電気パンの実験装置は、図 1 のように牛乳パックなどの底部を切り取って作った容器に、金属板を設置したものである。この金属板が電極となり、この電極にコンセントプラグとコードからなる交流電源をつなげれば装置は完成である。金属板には加工も容易で安価なアルミニウム板やステンレス板が用いられることが多い。



図 1 電気パンの実験装置の例

1 明星大学大学院理工学研究科 物理学専攻 博士後期課程 電波天文学

2 明星大学総合理工部 総合理工学科 准教授 宇宙線物理学

2・2 電気パンの生地

生地の材料は、水とホットケーキミックスが良く使用される。ホットケーキミックスには通常、卵や牛乳などを混ぜるが、実験実習として行う場合は品質の管理の手間を省くため水のみで作られることが多い。

水とホットケーキミックスを 1:1 の割合で混ぜて作ったものをパンの生地として使用するとうまくいくことが過去の実験で経験的に得られている。

本研究ノートでの実験も、ホットケーキミックス 50g ミネラルウォーター50ml で作った生地を用いている。



図2 焼き上げる前の生地

2・3 ジュール熱

ホットケーキミックスで作られた生地に電気が流れるためにはイオンが必要である。生地には食塩やベーキングパウダーが含まれていて、これらが持っているイオンが運動し電気が流れる。電気が流れる際に生地の持つ電気抵抗によってイオンが運動するのを妨げるためジュール熱が発生する。このジュール熱によって電気パンは焼くことができる。

2・4 電気パン実験の問題点

2-1 と 2-2 で用意した装置と材料で実験を行い、焼きあがったパンと実験後の電極が図 3、図 4 である。この時に使用した電極はステンレス板である。

図 3 の焼きあがったパンの電極と接していた部分を見ると茶色く焦げたような状態になっているのがわかる、また図 4 の実験後のステンレス板電極の生地と接していた部分に酸化膜ができていることがわかる。この酸化膜から溶け出した酸化物が焼きあがったパンの中の接触面に付着している可能性がある。このため電気パンの実験についての資料では端の部分は切り取って食べないで捨てるなどの指示があるものもあり、やはり食べるには適してない要素があることがわかる。

3. 電気分解について

電気分解とは、食塩水などの化合物に電圧をかけたときに、陽極で酸化反応を起こし化合物が分解されることをいう。とくに直流を用いて実験を行うと金属電極が電気分解



図3 これまでの方法で焼いたパン

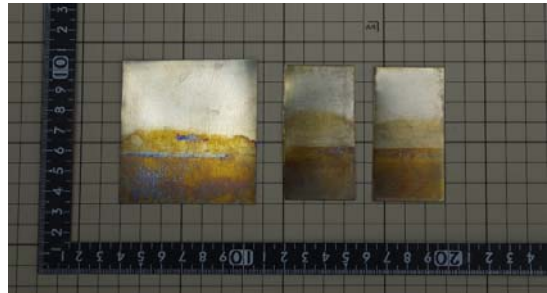


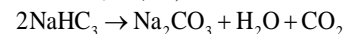
図4 実験後の電極

生地と接していた部分に酸化膜ができ変色していることがわかる。

によって金属イオンや塩素ガスが発生する。交流では起こりにくいが商用の 50Hz, 60Hz では周波数が低く、1000Hz 程度の周波数でなければ防ぐことができない。実際に 2-4 で行った実験も 50Hz の交流を使用しているが電極が酸化してしまっている。

3・1 酸化物生成過程

もっとも多く使われるアルミニウム電極の場合についてその過程を考察してみる。電気を流すことにより生地が膨らむのは、ホットケーキミックスに含まれる重曹つまり炭酸水素ナトリウムが熱分解し、



という反応で炭酸ガスが生じるためである。アルミニウムの炭酸塩は不安定で通常存在しないので、アルミニウム板の電極にできた被膜は、電気分解によって生成された $\text{Al}(\text{OH})_3$ か Al_2O_3 であると考えられる。アルミニウムイオンの過剰摂取は人体に有害である可能性がある。

3・2 食品衛生法の調理器としての電極の記述

厚生省発行の食品衛生法、食品添加物等の規格基準、第 3 器具及び容器、A-6 項に次のような記述がある。

電流を直接食品に通じる装置を有する器具の電極は、鉄、アルミ、白金及びチタン以外の金属を使用してはならない。ただし、食品に流れる電流が微量である場合にあっては、ステンレスを電極として使用することは差し支えない。

金属として使用できるのは、鉄、アルミニウム、白金、チ

タンである。また電流が微量の場合はステンレスも使えるとあるが、具体的な値の記述がないため、どの程度で食品衛生法に抵触するのか不明である。

4. 炭素で電極を作る

前章までで示した通り、電気パンの実験は電気分解による酸化物の混入、また食品衛生法への抵触を避けるために、これまでに使用されてきたアルミニウムやステンレスの電極ではない素材のものを検討する必要がある。電気分解による酸化を起こさない金属としては、白金やプラチナがあるが、これら高価な素材では手軽にできることが魅力の一つである電気パン実験にはそぐわないと考えた。

そこで今回、炭素を素材として選ぶことにした。炭素は電気を流すことができ、白金やプラチナなどと同様に電気分解による酸化を起こすことがない。また、金属ではないため食品衛生法に記載のある「鉄、アルミ、白金及びチタン以外の金属を使用してはならない」という記述にも該当しないので、この点でも問題がない。

4.1 備長炭について

炭素として身近なものにあげられるものが炭である。炭にはいくつか種類があるが大きく黒炭と白炭と備長炭に分けることができる。これらはその化学組成によって以下のように分類されている。

黒炭 ---- 炭素 75%以上
 白炭 ---- 炭素 85%以上
 備長炭 -- 炭素 95%以上

電極としてこれらを使う場合、炭素濃度が高い方が良いので、今回は 99%炭素の備長炭を選んだ。この備長炭は炊飯の際に遠赤外線作用で旨味を出すためや、飲料水に入れる浄化作用の目的に販売されているものである(図 6)。



図 5 電極用に選んだ備長炭

商品名：UYEKI 社製 土佐黄金の備長炭 1 本入り
 価格：オープンプライス(実売価格 500 円程度)

4.2 備長炭の加工

図 5 が選んだ備長炭である、この円柱形を縦に 5mm 程度の厚みに切り平たい形状に加工する。備長炭の形にはバラ

ツキがあり、一本当たり平たい電極は 1 枚か 2 枚切り出すことができる。図 6、図 7 は今回実際に加工する際に使用したファインカッターと刃である。



図 6 加工に使用したファインカッター



図 7 カッターで使用した切断砥石の刃



図 8 加工の様子

炭素である備長炭は非常に硬度が高く、今回使用したファインカッターと切断砥石では切りづらく、何度も刃が割れてしまった。この点は今回の実験方法の提案においてもっともネックになってしまっているところである。しかし、今回使用したガラスや陶器を切断するためのファインカッターではなく、コンクリートなどを削りながら切断するコンクリート切断用カッターを使用すれば、簡単に備長炭を加工することができるはずである。

4-3 作成した備長炭電極

図9が備長炭を切り出して作成した、炭素電極である。今回はこれまでの実験と同様に紙パックの底部を切り取ったものをパンの容器としており、切り出した縦長の電極を二枚並べて使用することで一つの電極としている。

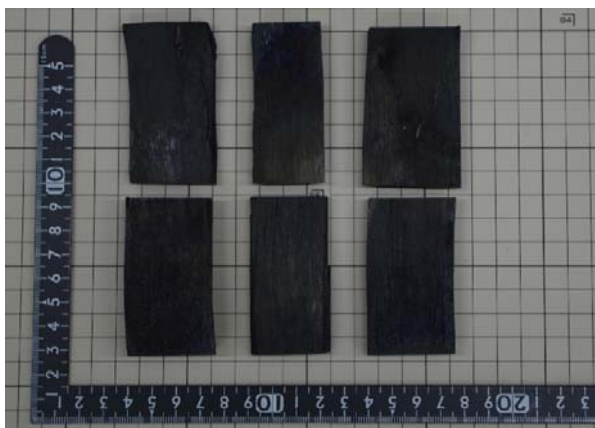


図9 作成した備長炭電極

元となった備長炭の形にバラツキがあるので幅が3.2cmから4.1cmで、この中から二枚を組み合わせて紙パックで作

5. 備長炭電極を取り入れた実験装置

1章で紹介したこれまでの電気パン実験装置に、今回作成した備長炭電極を取り入れ、また実験中の生地 of 電気抵抗の変化を見るためにも電流計を入れた装置を使用した。

5-1 使用する部品類

実験で使用する部品類を図10に示す。使用する部品は以下のものである。

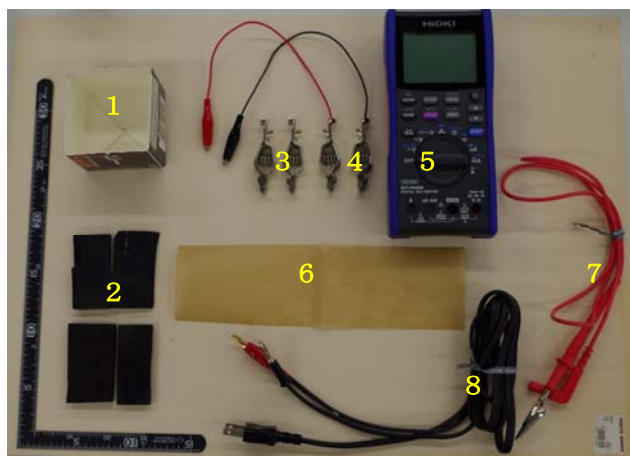


図10 使用する装置の部品類

- 1 ----- パンの容器
- 2 ----- 備長炭電極4枚
- 3 ----- 大型ワニ口クリップ2個
- 4 ----- 大型ワニ口クリップ-ワニ口クリップのコード2本
- 5 ----- デジタルマルチメーター(電流計として使用)
- 6 ----- クッキングペーパー
- 7 ----- バナナ-ワニ口のコード
- 8 ----- 交流電源装置(コンセントプラグと逆側の先端はワニ口クリップとバナナ端子になっている)

5-2 生地を入れるケース

生地を入れるケース、つまりパンの型となる容器は後述の導電率に大きく影響する。過去の実験例でもよく使用されている紙パックの底部を用いたケースは、焼きあがり時間、生焼にならないなどの点では問題がないので、本研究でも同様のものを使用する。

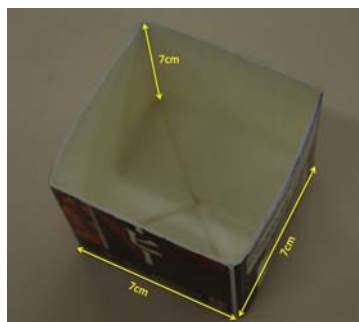


図11 紙パック飲料の容器で作成した生地を入れるケース

今回は作成した備長炭電極に合わせ、底部から7cmのところで切った、底面7cm×7cm、高さ7cmの図11の容器を、生地を入れるケースとした。

5-3 導電率

電極間の水溶液に流れる電気は導電率で表される。導電率 σ は

$$\sigma = \frac{E(V) \times S(\text{cm}^2)}{I(A) \times d(\text{cm})} \quad (1)$$

である、 I は電流、 E は電圧、 d は電極間の距離、 S は電極の面積である。導電率が小さいと電気は流れにくく、大きいと流れやすい。

5-4 電源プラグと電極の接続

今回使用する備長炭電極はこれまでの実験で使われてきたものと比べ厚い。2章で行った実験で使用したステンレス板の厚みが0.5mm程度であるのに対し、備長炭電極は5mm程度あるため、通常用いられるワニ口クリップでは電極をケースに固定することができない。このため図12のような大型のワニ口クリップを用意した。



図 12 電極接続で使う大型のワノロクリップ

5.4 パンの生地

電気パンの生地は、2 章の実験で使用したものと同じ、ホットケーキミックス 50g、ミネラルウォーター50ml を混ぜたものを使用する。

6. 実験方法

4 章で用意した装置を使ってパンを焼いていく。手軽な実験ではあるが、感電の恐れがあるので初めてこの実験を行う場合は経験者あるいは電気実験に詳しい者を行うことを勧める。交流電源装置のコンセントプラグは必ず最後に接続し、通電中は絶対にパンを含む装置等に触らないようにする。

5.1 ケースと電極の準備

図 10-1 のケースの中に、6 のクッキングペーパーを敷き、その上から 2 の電極二枚 1 セットを二組向き合うように設置する。この電極を固定するために、3, 4 の大型ワノロクリップを電極とケースを挟むようにセットする。4 の小型のワノロクリップは隣の電極のネジ部分に噛ませる。組み立てたケースと電極が図 13 である。



図 13 ケース周りのセッティング

5.2 電流計

今回は実験中の生地の電気抵抗の変化を見るために、電源とケースの間に電流計を入れた。電流計を接続して完成した装置全体が図 14 である。

5.4 比較のために使用した電極

実験は、今回新たに作成した備長炭電極に加え、これまで使用例が多いステンレスとチタンでも同様の実験を行っ

た。材質以外の条件を揃えるために、備長炭電極と同じように 3.5cm×7cm の縦長のもの二枚を 1 セットとして使用した。

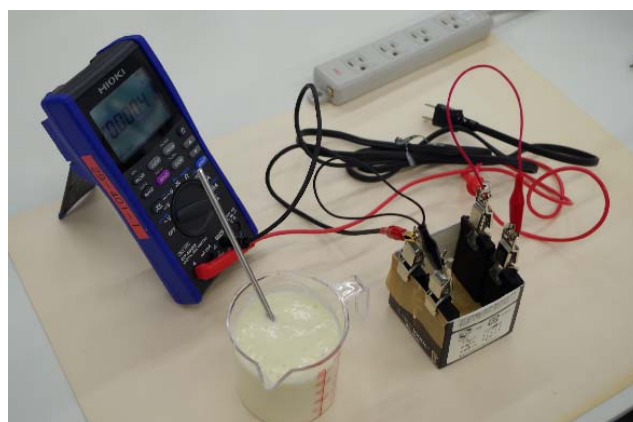


図 14 装置全体

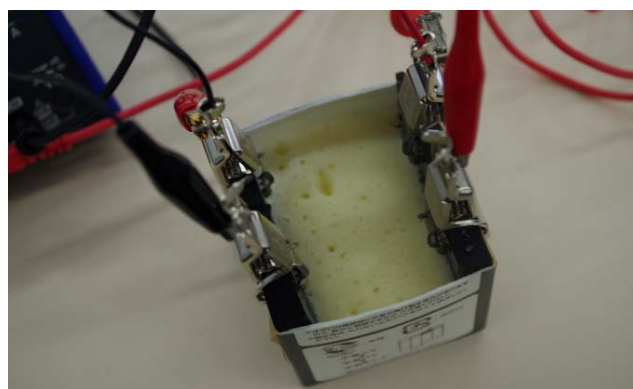


図 15 通電中のパンの様子

5.3 焼き上がりの判定

電気パンはジュール熱によって加熱される、この時に流れる電気は生地の温度が上昇することで流れやすくなるため、電源を入れると電流値は上昇していく、そしてある時点でピークを迎え、その後は焼きあがっていくにしたがって生地の中の水分がなくなるため、今度は電流値が下がっていき、最終的に 0A を示して、電気は流れなくなる(図 15)。

よって今回の実験では生地の状態ではなく、接続した電流計が 0A を示すまで電源を入れ、その間の 10 秒ごとの電流の値を記録する。

5.4 感電に注意して電源を入れる

コンセントプラグを差し込むと電圧 100V、周波数 50Hz の交流電源によって加熱が始まる。通電中は絶対に装置に触れない。10 分間前後で電流計が 0A になるので、コンセントプラグを抜いて実験は完了である。

6. 実験結果

実験結果について、備長炭電極と金属電極に分けて述べる。

6-1 備長炭電極の結果

備長炭電極を使って焼き上げたパンが図16、図17である。実験中の電流の変化を10秒ごとに計測した結果のグラフが図18である、電流が0Aになるまでの時間は430秒であった。電極、パンともに変色は見られず、生焼け状態にもならず、うまく焼き上げられていると言える。



図16 備長電極で焼き上げたパン

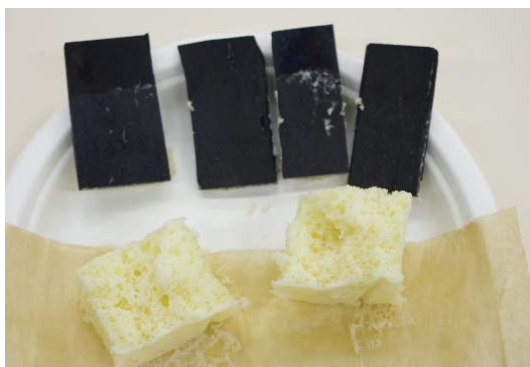


図17 備長電極で焼き上げたパン

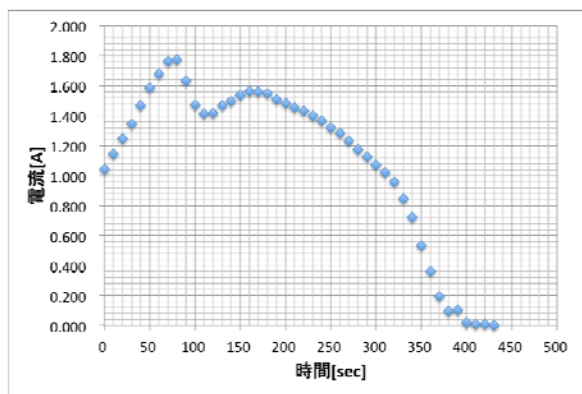


図18 備長炭電極での電流の時間変化

6-2 ステンレス電極とチタン電極の結果

ステンレス電極を使って焼き上げたパンが図19、チタン電極を使って焼き上げたパンが図20である。ステンレス電極を用いた実験は実質的に2章で行ったものと同じである。実験中の電流の変化が図21である。焼きあがるまでの時間はステンレスが570秒、チタンが720秒であった。パンに変色は見られなかったが、電極にはステンレス、チタンともに酸化膜ができています。パン自体は生焼けにはならずうまく焼き上げられていると言える。



図19 チタン電極で焼き上げたパン



図20 ステンレス電極で焼き上げたパン

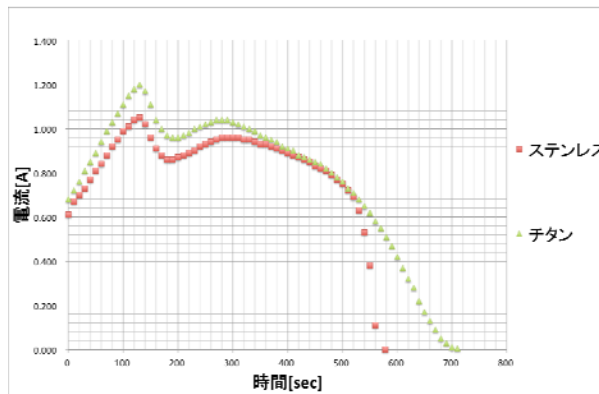


図21 金属電極での電流の時間変化

7. 考察

結果について電流の変化などにも注目して考察していく。

7-1 酸化物の混入していない安全なパン

図 16 の備長炭電極を使って焼き上げたパンには、電極、パンともに変色は見られなかった。これは炭素電極を用いたことで電極の酸化を考慮しなくてよくなった。焼きあがったパンに酸化物は入っていないと考えられ、食品としても安全なものができる。

7-2 電流が流れなくなるまでの時間

金属電極に比べて、備長炭電極はパンが焼きあがるまでの時間が短かった、これは 5-3 で示した電気の導電率の違いによるものである。今回実験では 7cm 四方の容器を、備長炭でも金属電極でも使用しているが、備長炭電極は厚みが 5mm 程度あるため導電率の式(1)における d が 6cm になり、底面積が小さくなった分、生地表面が持ち上がり電極と接地する面積 S が大きくなる。その導電率は実験中平均的に流れている電流を 1A とし、100cc の生地を使ったときを考えると式(1)より金属電極の場合は、 d が 7cm となり

$$\frac{1(A) \times 14.28(\text{cm}^2)}{100(\text{V}) \times 7(\text{cm})} = 2.04 \times 10^{-2} (\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$$

であり、備長炭電極の場合は d が 6cm となり

$$\frac{1(A) \times 16.66(\text{cm}^2)}{100(\text{V}) \times 6(\text{cm})} = 2.77 \times 10^{-2} (\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$$

となる、電極面積 S は電極そのものの面積ではなく、生地と電極の接触面の面積であることに注意する。

つまり、1.3 倍程度備長炭電極の方が電気を流しやすかったことになる。そこで図 22 のような備長炭電極でも電極間距離 d が 7cm となるような容器を作り、再度実験を行った。この追加実験の結果を含めたグラフが図 23 である。

電流の変化においては、電極間距離が同じであれば電極別の大きな違いは見られないことがわかった。



図 22 電極間距離を 7cm にした備長炭電極用容器

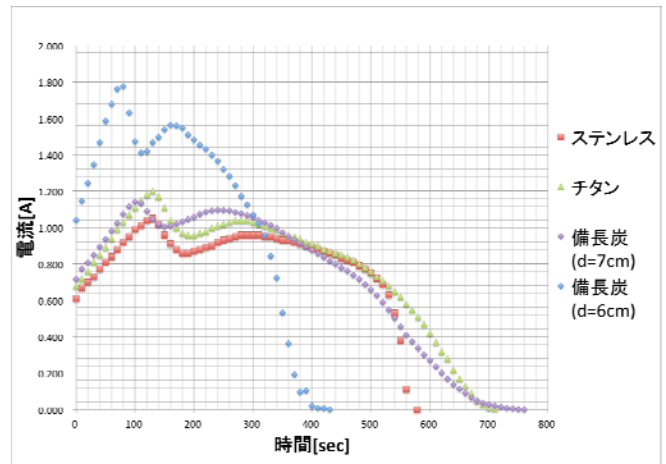


図 23 各電極の電流の時間変化

7-3 電流の 2 つのピークについて

電極間距離の違い、電極の材質の違いによらず、電流の変化において、そのピークが二回現れていることが見て取れる。これは生地の中のデンプンによる作用で起こる現象である。デンプンは 50°C を超えると糊化を始める、糊化が始まるとデンプンは水を吸収して膨張する。膨張すると電気伝導を担うイオンの移動度が減少し、イオンの実効的な抵抗値が上がり、導電率が下がる。この状態が図 24 の BC 間である。その後温度がさらに上がると、膨張したデンプンは崩れ、イオンの移動度が回復して、再び導電率は上がっていく。CD 間でこの現象が起こっている。AB 間と同様に CD 間では生地の水分の蒸発によるイオンの移動度の減少が起こるまで電流値は上がり続け、D 点でピークを示し、その後減少していく。DE 間の電流の変化でステンレスの場合に違いが見られるのは、熱伝導率の違いによるものと思われる。

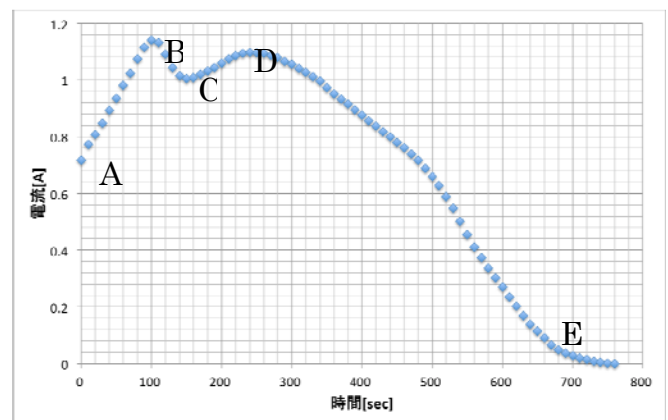


図 24 デンプンの糊化による 2 つのピーク
備長炭電極を電極間距離 7cm で実験した時のもの

8. まとめ

今回備長炭を加工して作成した電極を用いることで、これまで電気パン実験で問題点としてあげられていた、電気分解によるパンへの酸化物混入を避けた電気パン実験の方法を確立できた。

電気パン実験は実験を通して、ジュール熱、エネルギー交換、抵抗の理解など物理実験として学べる要素が多く、また焼きあがったパンを食べることができるため、小学校などにおいても学生の関心を惹きつけることのできる魅力的なテーマである。

しかしながら、昨今食への安全性が強く求められる傾向にあるため、とくに初等教育の場から電気パン実験が除かれてしまっていた。

今回確立した安全なパンを焼き上げる方法を提案することで、電気パン実験が教育現場において再度普及することが期待できる。



2015 年度に夏休み科学体験教室で本研究を実施した時の様子

参考文献

- (1) 滝川洋二：「物理がおもしろい」，日本評論社
- (2) 岡田直之：「電気パンの電流値変化」，物理教育，57 卷，2 号 (2009)
- (3) 松岡守：「電気パンの電气的特性と安全性の実験的評価」，日本産業技術教育学会誌，43 卷，3 号 (2001)