

# 逆半熟たまごを作ろう

チーム名：半熟 HERO

代表者氏名：白川 道人

所属：信州大学工学部機械システム工学科

## 実験背景

熱を利用し調理することは現在の私たちにとってごく日常的なことである。熱を使った調理法には、焼く、炒める、煮る、茹でる、揚げるなど多種多様であるが、どの調理法も外から熱を与えることにおいて共通する。加熱が十分でなかったという経験は誰しもあるのではないか。

そこで、熱を内部から加えることにより食品を調理してみたいという考えに至った。熱を加えるだけで簡単においしくいただくことのできる「たまご」をとりあげ、内部から熱を加え調理する。「たまご」の選定理由には、「たまご」に含まれるタンパク質が、熱により固化する性質に注目して熱の伝わりを観察する意図がある。

## 実験目的

「たまご」を使った料理のなかでも「ゆでたまご」をとりあげる。単純に「ゆでたまご」を目指すだけでなく、「逆半熟たまご」\*1など「たまご」内部からの加熱の加減により見たこともないような調理たまごを目指す。

\*1 ここでは卵黄のみが固化した「たまご」を意味する。

## 原理




卵白と卵黄ではタンパク質の種類が異なるため、固化する温度に差が生じる。この温度差を利用して加熱温度を調節し内部より直接加熱する。ちなみにそれぞれが固化する温度は、卵白は70 以上、卵黄は68 程度と知られている。

## < 基礎実験 1 >

### 実際にゆでたまごを作ってみる

たまごを内部から加熱する前段階として、外部からの加熱によってゆでたまごを作ってみる。断熱容器に溜めた大量の湯にたまごを投入し、そのゆで具合を調べる。これにより、卵白と卵黄が固化する温度を確認することはもちろん、湯の温度と出来上がるゆでたまごの関係を明らかにする。

### ・ 準備するもの

			お湯  60 70 80
発泡スチロール 内寸 0.5×0.3×0.14m	鶏卵 30 個 S~MS(46 ~ 58g)	温度測定器 T 型熱電対	それぞれ 15L

### ・ 実験装置

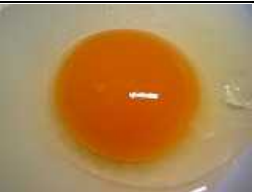



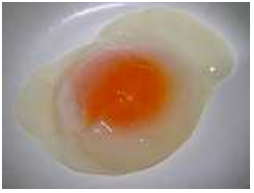













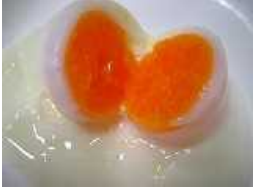

- ✓ 発泡スチロール（断熱容器）に湯をため、一度に 5 個のたまごを投入する。レコーダーによる温度測定は、実験終了時著しい湯の温度低下がないか調べる為と容器内で熱のよどみがないことを確認するために用いている。

・ 実験手順

	<p>湯を発泡スチロールに15L 用意する．実験は80℃, 70℃, 60℃の湯で行う． T型熱電対で湯の温度を測定する．</p>		<p>取り出した後でも分かり易いようたまごには印をつけておく． 一度に5個のたまごを湯の中に投入し，断熱容器に蓋をする．</p>
	<p>実験は9～30分の3分置きと60分, 90分の計10点の加熱時間を取るため，最長21分の実験と最長90分の実験に分けて行う．</p>	 <p>60℃ - 実験前</p>  <p>60℃ - 実験後</p>	<p>60℃の湯で5個のたまごを最長21分茹でた時の湯の温度変化を示す． この結果からおおよそ60℃で加熱できていると判断する． 結果を比較する．</p>

・ ゆであがりの比較（主なデータのみ）

	9min	12min	15min	18min
60	 <p>サラサラした卵白とドロドロした卵白</p>	 <p>ドロドロした卵白の割合が増える</p>	 <p>少し盛り上がっている 暖かいが生っぽい</p>	 <p>かき混ぜても卵白がある程度までしか分離しない</p>
70	 <p>卵白がドロドロ ヌルヌルして美味くない</p>	 <p>卵黄周辺の卵白が固化 卵黄は温まっただけ</p>	 <p>ゆでたまごっぽい形 ドロっとした卵黄</p>	 <p>まだ卵黄はドロドロ 温泉たまごに似た食感</p>
80	 <p>中心まで固まっていない 半熟でとろける舌触り</p>	 <p>卵黄が薄いオレンジ色 もっちりとした歯ざわり</p>	 <p>ほぼ固化 固すぎず柔らかすぎず</p>	 <p>硫黄の臭い・卵黄は黄色 パサパサ・完全に固化</p>

	24min	60min	90min
60	 <p>ゼリー状のような卵白 まだ食べたくない感じ</p>	 <p>卵白が透明でなくなる 美味しくはない</p>	 <p>ぶよぶよした卵白 気持ち悪い食感</p>
70	 <p>卵黄が固化 食感の違いが楽しめる</p>	 <p>卵黄に更に熱が通る ドロドロともちもち</p>	 <p>切るときの感触が変わる 卵白もある程度固化</p>

本実験時間内においては以下のことが確認できる。

- (1) 60 の湯で 90 分加熱しても卵白・卵黄ともに固化には至らない。
- (2) 60 後半～70 の熱源を用いて初めて卵白・卵黄ともに固化し始める。
- (3) 卵白は 70 では完全に固化せず、あくまでもドロドロの状態。卵黄は 70 である程度固化し、指で押しても型崩れしない。
- (4) 80 程度で卵白と卵黄ともに完全固化する。

以上の結果から

ヒーターを用いて卵黄だけを固化させるには、ヒーター表面温度を 70 ～80 程度に制御するとよい。

本実験で用いるヒーターの伝熱面積は、たまごの表面積に比べかなり小さいので内部から加熱する際、より多くの時間を費やすと予想される。

#### ・ 次へのアプローチ

続いて、これらの結果を生かし、ヒーターに加える電圧とヒーター近傍温度の関係を明らかにする。これにより、たまごを内部から加熱する際にふさわしい電圧を調べる。

## < 基礎実験 2 >

### 加える電圧とヒーター近傍温度の関係

たまごの内部にヒーターと熱電対を差込み、スライダックを用いてヒーターに加える電圧を変化させる。これにより、ヒーターに加える電圧がヒーター近傍の温度に与える影響を調べる。

### ・ 準備するもの

				
ヒーター 2.3mm L35mm	鶏卵 S~MS(46 ~ 58g)	断熱材 ポリスチレン フォーム保温板	スライダック	温度測定器 T型熱電対

### ・ 実験装置







- ✓ 穴を設けたたまごを断熱容器に入れ、穴にはヒーターと熱電対を差込む。ごく小さな穴に差込むのでヒーターと熱電対は近接している。スライダックを用いてヒーターに加える電圧を調節し、それによるヒーター近傍の温度変化をレコーダーで記録する。

・ 実験手順

	<p>断熱材容器にたまごを入れ，ヒーターと熱電対を差し込む．</p>		<p>蓋を閉じ断熱する．  レコーダーが定常状態を示すまで放置する．</p>
	<p>定常状態が確認されたら，スライダックを用いて電圧を 10V ずつ変化させる．</p>		<p>レコーダーで温度変化を測定し記録する．</p>

・ 実験結果

	<p>電圧を 10V 毎に変化させるが，ヒーター近傍の温度変化が確認できなかった．40V を超えたときジュ〜っという音とともに鼻をつく臭気が漂う．蓋を開けると穴から卵白が吹き出て固まっているのが確認できた．</p>
	<p>たまごの殻を割りヒーター差込口を見ると，穴をふさぐように卵白が固まっている． ヒーターを空気中にさらすと，パチパチ音を立て焦げ臭くなる．</p>
	<p>ヒーターは写真のように焦げついてしまった． ヒーター近傍にあった熱電対も卵白の固化によってヒーターに引っついてしまった．</p>
	<p>たまごにはまったく火が通っていない． 一部固化した部分が破け卵黄が流れでているのが分かる． 今回の実験は正しい温度が測定できるよう熱電対を設置しなかったことと，急激に電圧をあげたことが原因のようだ．</p>

・ 次へのアプローチ

ヒーターの焦げつきは極力避けたい。

まず、空気中における電圧とヒーターの表面温度の関係を調べる。  
安定した電圧の変化を得たい。

直流安定化電源を用いて、1 ~ 2V ずつ電圧を変化させる。

ヒーター表面の正しい温度測定。

熱電対をヒーター表面に接着させる。

卵黄までヒーターが届いていない。

L=35mm のヒーターから L=100mm のヒーターに変更。



### < 基礎実験 3 >

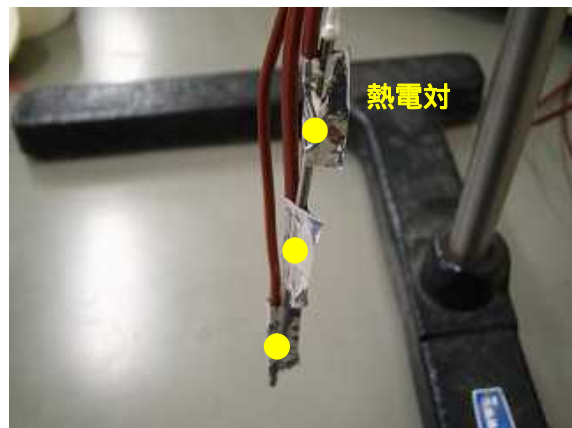
#### 加える電圧とヒーター表面温度の関係（空気中における）

アルミテープで熱電対をヒーター表面に接着させ、加える電圧とヒーター表面温度の関係を調べる。また、周囲環境温度の影響が限りなく小さくなるようヒーターはアクリル円筒内で宙吊りとした。

#### ・ 準備するもの

				
ヒーター(L=10cm)表面にアルミテープで熱電対を貼り付けたもの	アクリルパイプ 内径 =0.06[m] 外径 =0.08[m] 長さ L=0.25[m]	検流計	直流安定化電源	温度測定器 T型熱電対



#### ・ 実験装置



- ✓ アルミテープを使用してヒーターに3つの熱電対を接着し、アクリル円筒内に宙吊りにする。直流安定化電源を用いて、ヒーターに加える電圧を1Vずつ2~16Vまで変化させ、ヒーター表面温度をレコーダーにて記録する。
- ✓ ヒーターの表面温度は3つの熱電対が示す値の平均値とする。

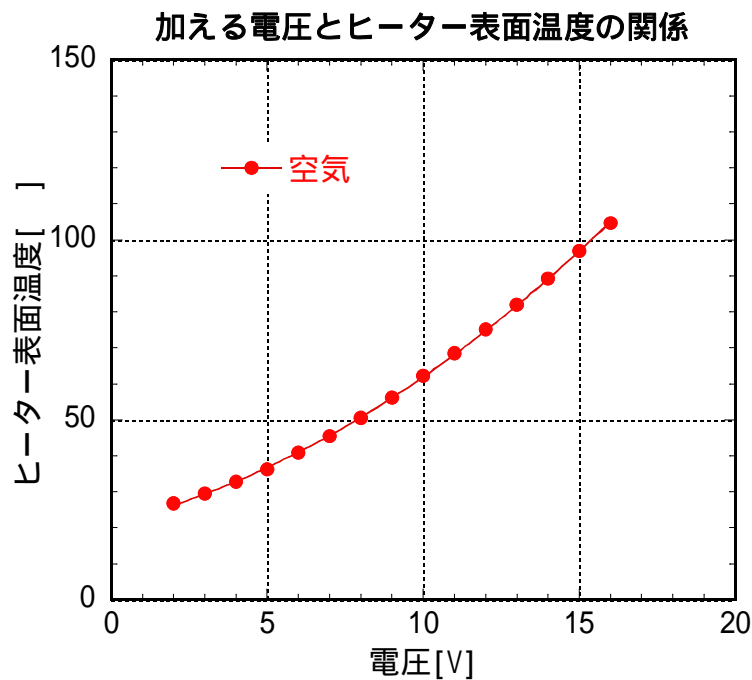


## ・ 実験手順

	<p>ヒーターをアクリル円筒内に入れ、宙吊り状態で空気中にさらす。 このときアクリル円筒に触れさせないこと。</p>		<p>都度、定常状態が確認されたところで電圧を1Vずつ変化させる。 レコーダーで温度変化を記録する。</p>
---	--	--	--

## ・ 実験結果

縦軸にヒーター表面温度，横軸にヒーターに加える電圧としグラフに示す。



熱電対の被覆が焦げることもあり 16V で実験を終えた。グラフはヒーター表面 3 箇所の平均温度を表したものであるが、ヒーター表面温度のバラつきは大きくても 3 であった。

## ・ 次へのアプローチ

ヒーター表面の焦げつきを極力避けたい。

続いてこの結果を用いて、液体中でのヒーター表面温度を調べる。

適当な電圧の決定

液体中ではヒーターの表面温度が低下することが予想され、さらに電圧をあげる必要があると思われる。このため、液体に接触するヒーター表面と接触しない面の温度差を考慮し焦げつかず、且たまごを固化させうる電圧を調べる。

## < 基礎実験 4 >

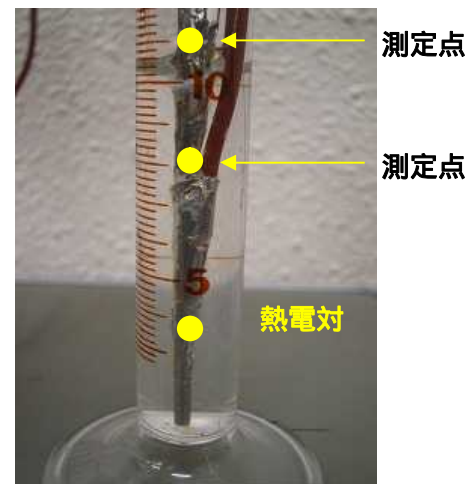
### 加える電圧とヒーター表面温度の関係（液体中における）

3種の試料液（卵黄・卵白・水）を10mlずつそれぞれ用意し、液体中における電圧とヒーターの表面温度の関係を調べる。温度測定は液体中のヒーター表面と空気中のヒーター表面とした。

#### ・ 準備するもの

				
ヒーター(L=10cm)表面にアルミテープで熱電対を貼り付けたもの	試料液(左から) 卵黄 卵白 水	検流計	直流安定化電源	温度測定器 T型熱電対

#### ・ 実験装置



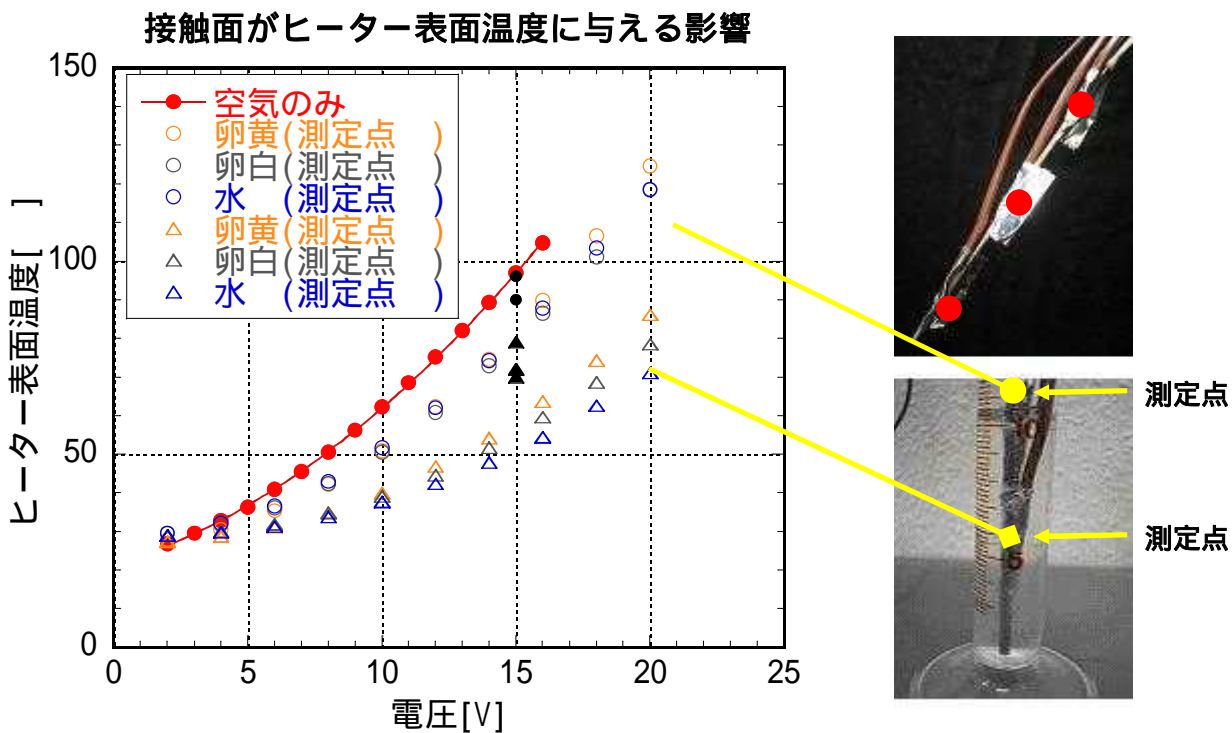
- ✓ ヒーターに3つの熱電対をアルミテープで接着し、メスシリンダー奥までヒーターを差込む。このとき一番上部にあたる熱電対は液体と接触していない。メスシリンダーには断熱テープを巻きつけ、直流安定化電源による電圧の調整とそれに伴う温度の変化を記録する。

・ 実験内容

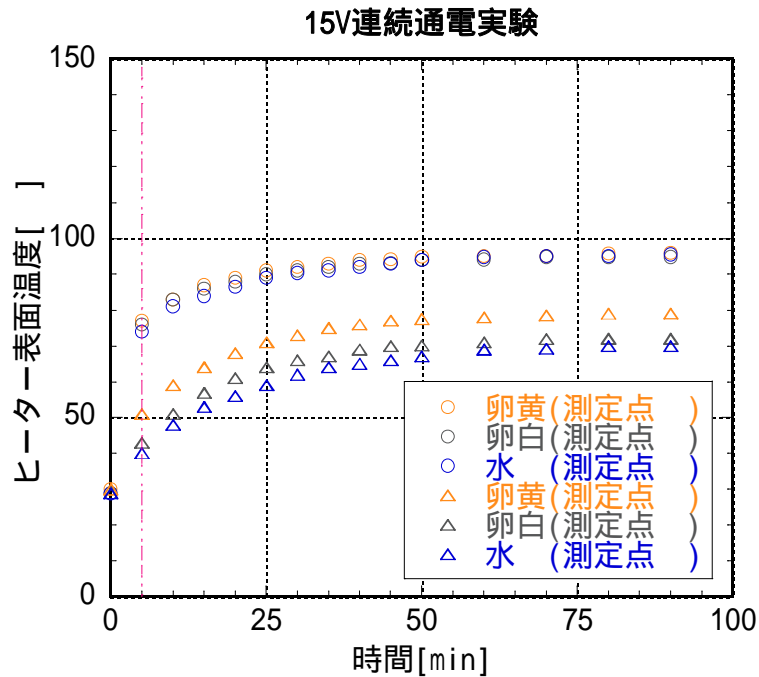
	<p>ヒーターをメスシリンダー奥まで差込む。</p>		<p>メスシリンダー側面に断熱テープを巻き定常状態になるのを待つ。</p>
	<p>直流安定化電源を用いて電圧を 2V ずつ 2~20V まで変化させる。</p>		<p>電圧の変化は 5 分置きに行い 温度変化をレコーダーで記録する。</p>

・ 実験結果

先ほどのグラフに実験結果を加えて示す。プロットが測定点の温度変化、プロットが測定点の温度変化を表す。測定点 は空気中のヒーターの表面温度を、測定点 は液体中のヒーターの表面温度を測定している。



本実験では、ヒーターに加える電圧を 5 分置きに変化させているため、所定の電圧に対し更に時間を費やせばヒーターの表面温度は赤色の曲線に近づくものと考えられる。確認のため、15V で 90 分通電し、結果を、プロットでグラフに示したところ温度は大きく上昇しているのがわかる。したがって、断熱の性能によって、液体中でのヒーター表面の平衡温度は赤で示す曲線に近づくと思われる。また、15V で 90 分通電したときの温度変化をグラフに示す。



さて、これらの結果を検討すると 15V で 90 分通電したところ、ヒーター表面が卵黄・卵白に接触する際のヒーター表面温度は 70~80 に漸近しており、たまごの内部加熱にはこのあたりの電圧がふさわしいのではないかと考えられる。また、接触する液体の種類によってヒーター表面の温度勾配に差が生じているのがわかる。以下には、実験終了後のヒーターの観察結果を示す。

		
<p><b>卵黄</b> 内径と同じ程度の卵黄の固まりが確認できる。</p>	<p><b>卵白</b> 微量だがヒーター周りが固まる。</p>	<p><b>卵白</b> 上部の卵白が固化しはじめプルプルしている。</p>

・ 次へのアプローチ

液体中でのヒーターの表面温度

特に、水面より上の部分が 60 を超えたあたりから液体中の表面温度にバラつきが見られるようになり、熱伝導性や卵黄・卵白の固化による影響が考えられる。









水面を境にして

実験終了後の卵白の様子を見てもらうとわかるように水面に近づくほど卵白の固化が進んでいる。また、ヒーター周りの卵黄の固化の様子も水面に近づくほど太い。水面より上は液中より高い温度であるため、ヒーター表面全域に温度分布が生じていると思われる。このことから、たまごにヒーターを通して加熱する際は、ヒーターを貫通させて対称性を与えてやるとよい。

### < 基礎実験 5 >

#### 卵黄にヒーターを貫通させる

卵黄のみを固化させることを目的とした本実験において、ヒーターの表面温度のほかに重要なことは卵黄にヒーターを貫通させるということである。簡単に卵黄を貫通させる方法を紹介する。

手順	穴を開ける。 裏も開けてある。	狙いを定め まっすぐ刺す。	思い切って プスッと刺す。	結果
<b>縦向き</b>  * 丸みのある ほうを上向 きにする				
<b>横向き</b>				

結果より、縦向きと横向きでは縦向きの方がより貫通させやすい。決して横向きでは貫通できないわけではなく、これはカラザと呼ばれる卵黄と殻をつなぐバネのような部位がたまごの長辺方向に存在し、縦向き(特に丸みを上)にした場合、卵黄をちょうど中心に吊り

下げる役割をする為、縦向きでの貫通のほうが容易となる。



・ 本実験へ






以上の基礎実験で得たヒーターの特性，卵黄と卵白の簡単な性質および卵黄をうまく加熱するための工夫を利用して 2.3mm，長さ 100mm のヒーターでたまごを内部より加熱する。

### < 本実験 >

逆半熟たまごを作ろう

これまでの基礎実験を参考に，カートリッジヒーター( 2.3mm ,L100mm)を用いてたまごを内部から加熱する。たまごが焦げつかないようにヒーターに加える電圧を決定し，電圧と加熱時間の変化でどのような調理たまごができるか実験する。

・ 準備するもの

				
ヒーター( 2.3mm , L100mm )の表面にアルミテープで熱電対を貼り付けたもの	鶏卵 S~MS(46 ~ 58g)	検流計	直流安定化電源	温度測定器 T型熱電対



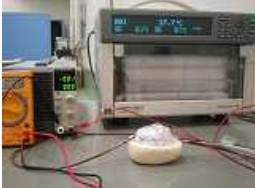


・ 実験装置



- ✓ 基礎実験から得たヒーターの特性を参考に，直流安定化電源により所定の電圧を与え長時間連続的に加熱する．たまごはアルミ箔と断熱容器で包み，カートリッジヒーター 2.3mm を貫通させる．2 本の熱電対をたまご内部へ，1 本の熱電対をアルミ箔とたまごの間に接着しレコーダーで温度変化を記録する．




・ 実験手順

	<p>たまごの外側にアルミテープで熱電対を接着する．</p>
	<p>たまごにアルミ箔を巻きつける ヒーターを通す穴と，熱電対を差込む穴を 2.4 のプラスドライバーを用いてあける．このとき，亀裂やひびが入らないよう気をつける．</p>
	<p>ヒーターを差込む．ヒーターを差込む際は，たまごの長辺方向を鉛直向きにしてスムーズに貫通させる． 熱電対を 2cm 程度たまごの内部へ差込む．</p>
	<p>断熱材で作った蓋をして，たまごの準備は完了．</p>




	<p>ヒーターに直流安定化電源と検流計を取り付け，レコーダー，直流安定化電源，検流計の電源を入れレコーダーのプリントを開始する．</p>
	<p>定常状態が確認されたら直流安定化電源の output を押し所定の電圧を加え，実験開始時刻を記録し実験スタートとする．</p>
	<p>実験終了後，たまごの殻をハンマーで軽く割り殻をむく． 全体の様子とたまごの断面をデジカメで記録する．</p>

#### ・ 実験結果




まず，適当と思われた 15V の電圧で 9 時間にわたり加熱してみた．9 時間という実験時間はヒーターの伝熱面積がたまごの表面積に比べ 10 倍程度もの差があることと基礎実験の結果を考慮しておおまかに設定した時間である．

	<p><b>全体図</b> 卵白は半熟の状態で，殻をむくとボロっとはがれることがある． 実験終了時の温度は，たまご外部 62 ，内部 68 であり，この温度におおよそ到達したのが実験開始 6 時間後であった．</p>
	<p><b>断面図</b> ヒーターがうまいこと卵黄を貫通しているようすが覗える． この写真では分かりづらいが卵黄の固化の具合が色の変化で見取れる．卵白はやはり半熟で，自重で崩れてしまう．</p>
	<p><b>アップ</b> ヒーター近傍であるほど固化が進んで黄色く変色している． 卵白がこのままで卵黄が完全に固化してしまえば，逆半熟たまごの完成といえる．</p>

続いて、電圧を 17V とし 9 時間加熱してみた。

	<p><b>全体図</b> 卵白は完全に固化している。たまご表面は熱く、まさにゆでたまごを調理した後のような熱さ。 実験終了時の温度、たまご外部 75℃、内部 78℃、平衡までの時間 7 時間であった。</p>
	<p><b>断面図</b> 卵白も完全に固化している。卵白は焦げたのか全体的に少し茶色。食べてみると普通のゆでたまごと差異はないが特異な調理法ということもあり、気持ちおいしさは感じられない。 パサパサしており卵白は少し硬い。</p>
	<p><b>ヒーター周り</b> 焦げついている様子が確認されます。 これ以上の電圧で調理すれば更なる焦げつきが予想されるので、調理電圧は 17V までと決定した。</p>

続いて、16V で 9 時間加熱する。

	<p><b>全体図</b> 卵白はほぼ固化している。 実験終了後の温度は、たまご外部 73℃、内部 70℃。 平衡時間は 7.5 時間。</p>
	<p><b>断面図</b> 卵黄は 9 割近く固化している。 殻をむく際、半熟の卵白は殻にひっついてしまった。</p>
	<p><b>卵黄</b> 卵黄が簡単にとれた。完全に固化していることが確認できる。 外側はまだしっとりとした柔らかさがある。</p>

以降、電圧と加熱時間を変化させ実験を繰り返し行った。

## <結果のまとめ>

### 総論

結果，電圧を 10～17V で調整し，調理時間を 3，5，7，9 時間とした．これらのパラメータによりできあがった加熱たまごの断面を表にしてまとめてみた．また，状態や食べた感想，実験終了時の温度も合わせて記載する．

	3h	5h	7h	9h
10V	<p>記載内容</p> <p>実験終了温度(内部，外部)</p> <p>平衡時間</p> <p>状態</p> <p>味</p>			 <p>46 ， 40</p> <p>5 時間</p> <p>固化せず</p> <p>ちょっと無理です</p>
13V	固化せず	固化せず	 <p>55 ， 53</p> <p>4 時間</p> <p>ヒーターの端々のみ固化</p> <p>熱い生卵</p>	 <p>55 ， 53</p> <p>4 時間</p> <p>ヒーター周りのみ固化</p> <p>これは食べられません</p>
15V	 <p>63 ， 62</p> <p>平衡せず</p> <p>卵白はドロドロ温泉たまご</p> <p>つるっとした食感</p>	 <p>64 ， 62</p> <p>平衡せず</p> <p>ヒーター付近が固化</p> <p>卵黄のバサバサが加わる</p>	 <p>68 ， 64</p> <p>6.5 時間</p> <p>卵黄の固化が顕著</p> <p>もちもちつつバサバサ</p>	 <p>68 ， 62</p> <p>6 時間</p> <p>殻付近に焦げめ</p> <p>芋をふかした様なしっとり感</p>



<p>16V</p>	 <p>68 , 66 平衡せず 完全固化している部分はない まさに温泉たまご</p>	 <p>69 , 68 平衡せず 卵黄が半面完全固化 食感がまばら</p>	 <p>70 , 68 6時間 卵黄 8割 , 卵白 6割固化 卵黄だけゆでたまごっぽい</p>	 <p>73 , 70 7.5時間 卵白の固化も進み形状を維持 中心にいくほど硬い .</p>
<p>17V</p>	 <p>71 , 69 平衡せず 卵黄が一様に固化 逆半熟と呼べるか! ?</p>	 <p>79 , 72 平衡せず 卵黄 8割 , 卵白 5割固化 かなり食感にバラつきがある</p>	 <p>77 , 75 平衡せず ほぼゆでたまごと同じ状態 ごく普通の味</p>	 <p>78 , 75 7.5時間 卵黄が茶色に変色 パサパサで少し硬い</p>

この表から結果を見比べ、卵黄が固化し、卵白が半熟である「逆半熟たまご」を 16V - 5 時間で加熱したものと判断した。

< 16V - 5 時間 >

	<p>卵白が半熟で色鮮やかである。温泉たまご表面のようなプルプル感がある。</p>		<p>卵白が自重で崩れ、卵黄が固化しているため境目でキレイに剥がれている。</p>
---	---	--	---

外部からの加熱では卵白が固化しきる前に、卵黄を完全固化させるのは困難であるが、ヒーターを用いて内部から加熱調理した結果、**卵白が固化する前に卵黄を固化させることに成功した**。本実験で固化した卵黄の固化の具合は、俗にいう温泉たまごより更に固化し黄色く変色することも確認できた。

さらに、電圧と加熱時間を調整することで火加減が調節でき、**より様々な状態の調理たまごが確認された**。

## <おまけ>

### ゆでたまごにかかるお金は？

最後に興味があったので、17V - 7時間で調理した際の電気料金とお湯でゆでたまごを調理する際のガス料金を比較してみた。以下の条件で調理すると卵黄・卵白ともに完全固化するゆでたまごが出来上がる。

ヒーターで調理		ガスコンロで調理	
カートリッジヒーター		一般家庭用ガスコンロ	
定格電圧	100V	ガス消費量	2550kcal/h
容量	80W	熱量	10750kcal
使用電圧 17V での消費電力	2.2W	水	1L 用意
電気料金	20 円/kWh	ガス料金	45 円/m <sup>3</sup>
調理時間	7 時間	調理時間	15 分程度
<b>0.3 円</b>		<b>2.74 円</b>	

比較の結果7時間にわたる調理時間にも関わらず、**ヒーターで加熱するほうが安くなる**。これは、かなり驚きの結果であった。しかし、見た目やおいしさ、また手間暇がかかることを考えると手放しでは喜べない調理法である。やはり、ヒーターは調理器具ではないので食べるのに抵抗があったことは否定できない。