

<その4> 電子レンジ加熱時の液体または液状の内容物の温度

研究分担者 阿部 裕
研究協力者 山口 未来
研究協力者 片岡 洋平
研究代表者 六鹿 元雄

国立医薬品食品衛生研究所
国立医薬品食品衛生研究所
国立医薬品食品衛生研究所
国立医薬品食品衛生研究所

A. 研究目的

電子レンジは、電気でマイクロ波を発生させ、そのマイクロ波が食品などに含まれる水分子を振動させることにより発熱させる、いわゆる誘電加熱により食品を温める電化製品である。近年、コンビニエンスストアやスーパーマーケットなどでは、電子レンジを利用して温めて食べる商品の取り扱いが大幅に増えている。

我々は令和元年度の食品健康影響評価技術研究において、コンビニエンスストアで販売されている弁当や冷凍食品約 35 種類を対象に、蛍光式光ファイバー温度計を用いて電子レンジ加熱調理中の食品接触面の温度を測定した¹⁾。その結果、最終的な温度は 50~100℃となり、加熱調理途中で 100℃に到達しても加熱調理終了まで 100℃のままであった。このように、一般的な使用条件では、加熱されるのは主に食品中の水分であることから、加熱後の食品の温度は水の沸点である 100℃を大きく超えなかった。一方、サセプター(アルミニウムの薄膜を合成樹脂フィルムに蒸着または貼り付けることでマイクロ波を吸収し、誘導加熱の原理により高温で加熱する)を用いたポップコーンやピザなどの製品では 100℃を超えることがあった。

一方、電子レンジは市販の食品を加熱調理するだけでなく、様々な電子レンジ対応容器に食品や飲料等を入れて加熱調理する場合もある。特に、液体または液状の食品は、加熱しすぎると過加熱の状態となり、電子レンジから取り出す際に突沸するおそれがある。そこで本研究では、電子レンジ加熱時に器具・容器包装をより安全に使用するための基礎的な情報を収集

することを目的とし、様々な容量、材質、形状の容器に水を入れて電子レンジで加熱し、その温度推移を確認し、どの要因が温度昇温に影響しているかを検証した。さらに、酒や油等の温度推移を確認し、電子レンジ加熱する際の条件とその設定根拠についても考察した。

B. 研究方法

1. 試料

電子レンジに使用可能なガラス、陶磁器(陶器、磁器、ストーンウェア(炆器))、合成樹脂(ポリプロピレン(PP)、合成漆器)、シリコーンゴム製のピーカー及びマグカップ 20 種類。これらは神奈川県等の小売店やインターネットで購入した。種類、材質、容量、厚さおよび直径とともに表1に示した。

2. 試薬および装置

水:PURELAB flex 3 (ELGA LabWater 社製)で製造した超純水。

電子レンジ:業務用(温度センサーを挿入できるように上部に4か所穴あけ加工したもの)、NE-1802(パナソニック株式会社製)(図1)

蛍光式光ファイバー温度計:AMOTH FL-2000(安立計器株式会社製)



図1 実験に用いた電子レンジおよび300 mL 容ピーカーの測定の様子

表 1 試料情報

試料番号	容器		容量(mL)	厚さ(mm)	直径(mm)
	種類	材質			
1	ビーカー	ガラス	100	1.90	55
2	ビーカー	ガラス	300	2.15	70
3	ビーカー	ガラス	500	2.95	90
4	トールビーカー	ガラス	300	2.30	62
5	マグカップ	陶器	300	6.40	82
6	マグカップ	陶器	340	5.00	75
7	マグカップ	磁器	300	0.61	77
8	マグカップ	強化磁器	290	3.00	73
9	マグカップ	炻器	— ^{*2}	0.66	74
10	マグカップ	炻器	560	0.57	110
11	マグカップ	陶磁器 ^{*1}	— ^{*2}	0.65	80
12	マグカップ	陶磁器 ^{*1}	— ^{*2}	0.46	72
13	マグカップ	PP	270	2.90	74
14	マグカップ	PP	270	2.90	74
15	マグカップ	PP	290	3.20	61
16	マグカップ	PP	350	4.00	75
17	マグカップ	PP	230	1.60	66
18	マグカップ	合成漆器 ^{*3}	— ^{*2}	0.30	87
19	マグカップ	合成漆器 ^{*3}	— ^{*2}	3.60	73
20	マグカップ	シリコーンゴム	207	3.50	71

*1 記載はなかったが陶磁器製品。

*2 —:表示なし

*3 素地 PET,ABS/表面 ウレタン塗装

C. 研究結果及び考察

1. 測定位置の検討

はじめに容器内の温度の測定位置を決定するため、位置ごとの温度を測定した。300 mL 容のガラス製ビーカーに水 200 mL をいれ、温度センサーの先端を水中にセットし、500W で電子レンジ加熱したときの温度を測定した。なお、容器は 300 mL 容のガラス製ビーカーを用い、温度センサー挿入用の穴の位置の関係上、ビ

ーカーは電子レンジ内の中央ではなく、壁よりの位置に置いて測定した(図1)。温度の測定位置は、上部(液面から 0.5 cm 程度下の位置)、中央部(100 mL の目盛り付近)、下部(底から 0.5 cm 程度上の位置)、容器左部(電子レンジの壁面側)、容器中心部、容器右部(電子レンジの中央側)の上下左右各 3 か所を組み合わせた9か所(上左、上中、上右、中左、中心、中右、下左、下中、下右、図2)とした。

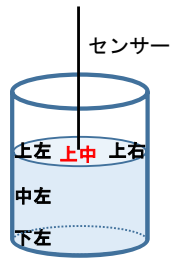


図2 センサー位置の模式図
(中央、中右、下中および下右は省略)

表2 100°Cに到達したときの時間(秒)

センサー位置	左	中	右
上	217	209	214
中	219	210	221
下	223	220	226

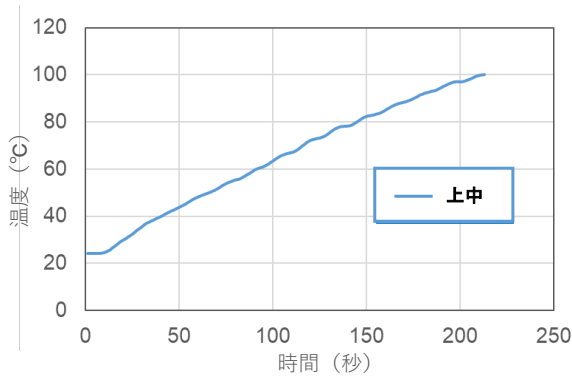


図3 電子レンジ加熱による水の温度変化
容器：300 mL容ガラス製ビーカー、溶媒：水、
容量：200 mL、出力数：500W、測定位置：中央・上

9か所での測定結果から、それぞれの位置について100°Cに到達するまでの時間(秒)を表2に示した。その結果、上中部または中心部が最も温度が上がりやすく、ビーカーのサイズを変えても同様であった。上中部の温度を5回繰り返して測定した結果、100°Cに到達したときの時間(秒)のRSD(%)は0.2%であり、再現性も良好であった。反対に、電子レンジ底面に接触する下部は最も温度が上がりにくかった。電子レンジの底面からはマイクロ波が照射されないため、内容物の下部が吸収するマイクロ波の量が少ないためと考えられた。代表例として上中部の温度推移を図3に示した。電子レンジ加熱開始約10秒後から温度が直線的に上昇した。その他の位置においても同様に上昇し、209～

226秒で100°Cに到達した。

水では100°Cに達すると沸騰し始め、生じた気泡によりセンサーの位置が不安定となる。そのため以降は、最も温度が上がりやすい上中部の温度を測定することとした。

2. 出力数による比較

300 mL容のガラス製ビーカーに水200 mLをいれ、150、250、500、750及び1000 Wの出力数で電子レンジ加熱した。各出力数における温度推移を図4に示した。

電子レンジの電磁波エネルギーは「出力数(W)×時間(秒)」となる。そのため加熱対象物の容量が同じであれば、500Wで2分間加熱した場合と、1000Wで1分間加熱した場合の電磁波エネルギーは同じとなり、対象物の上昇温度も同程度となる。今回の結果においても100°Cに到達した時間は、1000Wで106秒、750Wで148秒、500Wで209秒、250Wで418秒であり、概ね理論通りであった。ただし、150Wの場合15分以上加熱しても100°Cに到達しなかったため、途中で加熱を停止した。

また、各出力数において40、60、80及び100°Cに達するまでの時間を表3に、水温が40°Cから80°Cとなるまでの時間の逆数をx軸、出力数をy軸にとりプロットしたグラフを図5に示した。その結果、一次回帰直線は原点付近を通る直線となり、出力数と加熱時間は理論通り反比例の関係にあることが確認できた。

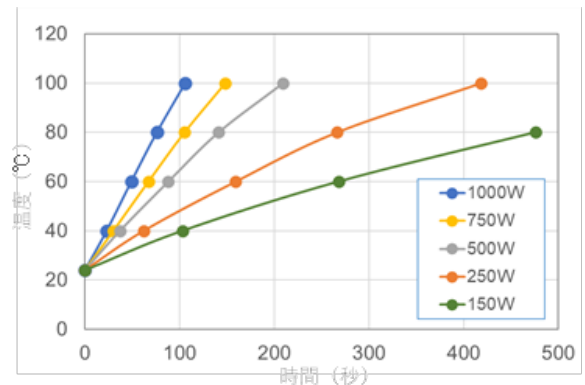


図4 異なる出力数における温度と時間の関係
容器：300 mL容ガラス製ビーカー、溶媒：水、容量：200 mL、出力数：150、250、500、750、1000W、
測定位置：中央・上、0秒時の温度は24°C

表3 各温度に到達したときの時間（出力数別）

出力数 (W)	40°C	60°C	80°C	100°C	40→80°C*
150	103	268	476	-**	373
250	62	159	266	418	204
500	37	88	141	209	104
750	30	67	105	148	75
1000	23	49	76	106	54

*40°Cから80°Cに到達した時間

**15分以上加熱しても100°Cに到達しなかった。

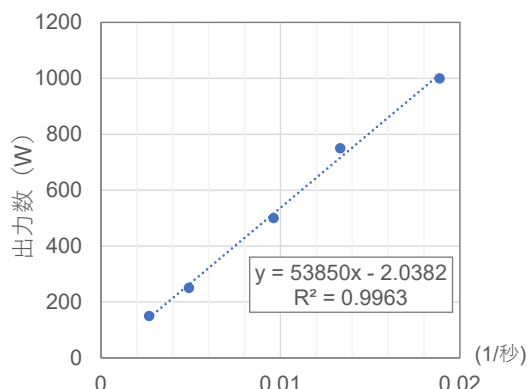


図5 出力数 (W) と 40°C から 80°C に到達するまでの時間 (1/秒) の関係
四角内は一次回帰直線の近似式および決定係数 (R²)

3. 加熱対象物の量および表面積の違いによる比較

電子レンジの出力数と加熱時間は反比例の関係となるため、加熱対象物が同じであれば、出力数に応じた加熱時間を容易に調整することができる。一方、対象物の形状や量が変わると対象物が吸収するマイクロ波の量も変わるため、対象物の量と加熱時間は単純な比例関係とはならず、量を半分にしたときに加熱時間を半分にすると加熱不足となり、反対に、量を2倍にしたときに加熱時間を2倍にすると加熱し過ぎてしまう傾向がある。そこで、100 mL 容、300 mL 容及び 500 mL 容のガラス製ビーカー、300 mL 容のガラス製トルビーカーに水 100、200 および 300 mL を入れ、500W で加熱した時の温度を測定して、加熱対象物の量および形状による温度上昇の違いを確認した。

水温が 40、60、80 及び 100°C に達するまでの時間、並びに 40°C から 80°C まで上昇するの

に要した時間を表4に示した。その結果、水温が 40°C から 80°C まで上昇するのに要した時間は、水 100 mL では 53~66 秒、水 200 mL では 96~104 秒(100 mL の約 1.6 倍)、水 300 mL では 124~136 秒(100 mL の約 2.1 倍)であった。

電子レンジは対象物がマイクロ波を吸収することで発熱するため、対象物の量が多い＝表面積が大きいほど、吸収されるマイクロ波が多く、エネルギー効率が高いと考えられた。そこで、それぞれの容器中の水の表面積(ただし、マイクロ波が放出されない底面の面積を除く)を概算し、40°C から 80°C まで上昇するのに要した時間と比較した。その結果、量が同じであれば容器の形状が変わっても表面積に大きな違いはないうえ、(100 mL: 94.7~96.5 cm²、200 mL: 152.5~159.2 cm²、300 mL: 196.9~223.7 cm²)、表面積と時間の比は、0.55~0.69 とほぼ同程度となった。また、表面積を x 軸、40°C から 80°C まで上昇するのに要した時間を y 軸にとりプロットしたところ、一次回帰直線は原点付近を通る傾きが 0.61 の直線となった(図6)。このように加熱対象物の表面積と加熱時間は比例関係となるため、加熱時間は対象物の量ではなく表面積を考慮して設定すると良いと考えられた。

表3 各温度に到達したときの時間（容量別）

容量 (mL)		40°C	60°C	80°C	100°C	40→80°C*
容器	試料					
100	100	19	43	72	105	53
300	100	25	55	91	134	66
300	200	37	88	141	209	104
300	300	43	106	180	266	137
300t**	100	22	51	83	118	61
300t**	200	36	82	138	195	102
300t**	300	34	89	158	237	124
500	200	38	82	134	193	96
500	300	41	109	177	266	136

*40°Cから80°Cに到達した時間

** 300mL容トルビーカー

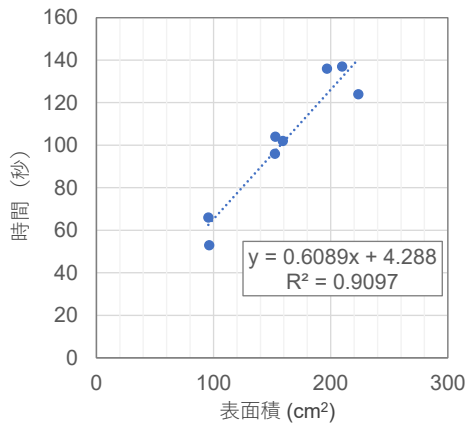


図6 表面積と40℃から80℃に到達するまでの時間の関係
四角内は一次回帰直線の近似式および決定係数 (R²)

4. 容器の材質による比較

陶磁器(磁器、炆器、陶器)、合成樹脂(PP、合成漆器)、シリコーンゴム製のマグカップに水200 mLを入れ、出力数を500Wとして電子レンジ加熱したときの温度および時間の関係を図7、40、60、80及び100℃に達するまでの時間、並びに40℃から80℃まで上昇するのに要した時間を表5に示した。記載順は40℃から80℃に上昇する時間が早い順とした。

その結果、ガラス、陶磁器等の無機材質は、合成樹脂と比べて40℃から80℃まで上昇するのに要した時間がやや短い傾向がみられた。また、表面積(底面の面積を除く)と40℃から80℃まで上昇するのに要した時間の比を求めたところ0.56~0.69となった。この結果は前項(3.加熱対象物の形状および量の違いによる影響)で得られた値と同程度であったことから、容器の材質は加熱対象物の温度に大きな影響を与えないと考えられた。また、今回試した試料では、容器の厚さと加熱時間に相関はみられなかったことから、いずれの材質もマイクロ波を吸収しないと考えられた。

以上のことから、材質によって昇温速度がわずかに異なる傾向が見られたが、その影響は小さく、材質ごとに加熱時間を調整する必要はないと考えられた。

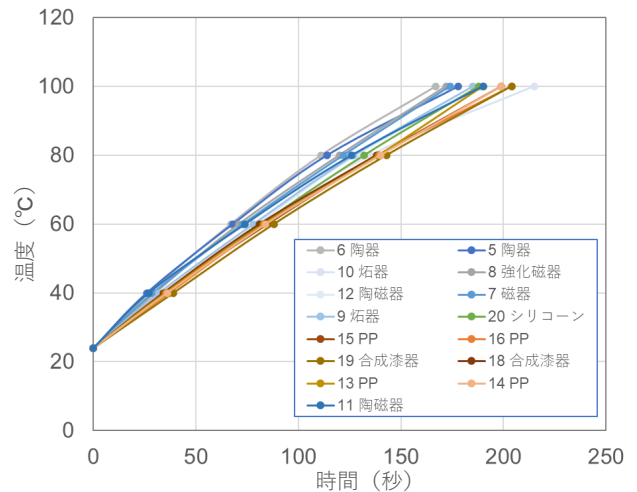


図7 異なる材質における温度と時間の関係
容器：陶器製マグカップ、炆器製マグカップ、磁器製マグカップ、強化磁器製マグカップ、合成漆器製マグカップ、シリコーンゴム製マグカップ、PP製マグカップ、溶媒：水、容量：200 mL、出力数：500W、測定位置：中央・上、0秒時の温度は24℃、試料は番号と材質を示した。

表6 各温度に到達した時間(材質別)

番号	試料 材質	40℃	60℃	80℃	100℃	40→ 80℃*1
		6	陶器	27	67	111
5	陶器	26	68	114	178	88
10	炆器	30	71	120	172	90
8	強化磁器	35	80	128	189	93
17	PP	29	73	122	174	93
12	陶磁器*2	35	82	130	190	95
7	磁器	32	78	127	185	95
9	炆器	36	82	132	188	96
20	シリコーンゴム	36	82	135	215	99
11	陶磁器*2	27	74	126	190	99
15	PP	37	84	139	204	102
16	PP	35	85	139	199	104
19	合成漆器*3	39	88	143	204	104
18	合成漆器*3	34	81	138	*4	104
13	PP	35	83	139	190	104
14	PP	36	84	140	199	104

*1 40℃から80℃に到達した時間

*2 記載はなかったが陶磁器製と推定される

*3 素地 PET,ABS表面 ウレタン塗装

*4 製品表示に準じ3分までの加熱としたが100℃に到達せず。

5. 加熱対象物の比較

内容物による温度の比較を行うため、水、酒(純米酒、アルコール分14度以上15度未満)、牛乳及び油(オリーブ油)を電子レンジで加熱し、

その温度推移を確認した。なお、いずれも 300 mL 容のガラス製ビーカーに 200 mL となるように入れ、室温に戻してから、500W で加熱した。各試料において 40、60、80 及び 100°C に達するまでの時間を表 6 に示した。

40°C から 80°C に到達した時間を比べると、水および酒は 105 秒、牛乳は 89 秒、油は 68 秒であった。牛乳および油で温度が上がりやすかったのは、水に比べ比熱 (物質 1 g を 1°C 上昇させるために必要な熱量) が低いと考えられた。

油は水よりも沸点が高いため、加熱しすぎると 100°C 以上の高温となり、火傷や発火のおそれがある。また、JIS S2029 では電子レンジに使用できるプラスチック容器の耐熱温度を 140°C と規定しているが、加熱時間が長いと油分の温度が 140°C を超え、非耐熱の容器や一部のラップフィルムを同時に加熱すると溶かしてしまうこともある。実際に油を 500W で加熱し続けたところ、217 秒後に 140°C に達した。

そのため、油分を含む食品を加熱する場合は、水よりも温度が上がりやすいため、加熱しすぎないように食品の表面積や油分含量に応じて加熱時間を調節する必要がある。また、油分を多く含む食品を加熱する際は、一部の合成樹脂製の容器やラップフィルムが溶けるおそれがあるため、200 mL の食品を 500W で 217 秒 (600W では 180 秒、700W では 155 秒、800W では 135 秒、1000W では 108 秒に相当) を超えて加熱する場合は、器具・容器包装の耐熱温度にも注意を払う必要がある。

また、酒類の昇温速度は水とほぼ同じであるが、エタノールは沸点が水よりも低いため、加熱しすぎるとエタノールの一部が揮散し、電子レンジ内で発生したスパーク等により引火するおそれがある。そのため、200 mL の酒類を加

熱する場合は、500W では 120 秒 (600W では 100 秒、700W では 86 秒、800W では 75 秒、1000W では 60 秒に相当) 以内にとどめるべきである。

表 6 各温度に到達した時間 (試料別)

試料	40°C	60°C	80°C	100°C	40→80°C*
水	39	90	144	204	105
酒	34	84	139	-**	105
牛乳	39	81	128	186	97
油	29	61	97	137	68

*40°C から 80°C に到達した時間

**加熱に伴って量が減ったため 80°C で加熱を停止した。

D. 結論

電子レンジ加熱時に器具・容器包装をより安全に使用するための基礎的な情報を収集することを目的とし、様々な容量、形状、材質の容器を用いて液体または液状の食品を電子レンジ加熱する際の条件とその設定根拠を検証した。その結果、上部中央の温度が最も上がりやすかった。出力数と加熱時間は理論通り反比例の関係にあったことから調整が容易であった。また、材質の違いが加熱対象物の温度に与える影響も小さいと考えられた。

一方、加熱対象物の形状や量が変わるとマイクロ波を受ける面積が変わるため、加熱時間は対象物の表面積を考慮して設定する必要がある。また、酒類や油分を含む食品を加熱する場合は、加熱しすぎないように加熱時間を調節する必要がある。

E. 参考文献

- 1) 六鹿元雄ら: 合成樹脂製器具・容器包装のリスク評価における溶出試験法に関する研究、平成 29 年度～令和元年度 食品健康影響評価技術研究 研究成果報告書 (2019)