

# 市販の電子レンジを利用した金属溶解装置の試作とその応用

## Trial Production of Metal Smelting System by Commercial Microwave Oven and It's Application

荒木 一郎\*・渡辺美恵子\*\*

Ichiro ARAKI and Mieko WATANABE

### Abstract

Metal smelting system in a commercial microwave oven was developed as a trial. Heating various carbon materials by microwave irradiation was investigated in regard to complex permittivity, size and weight of carbon materials. The "Binchotan" was proved to be heated up to 1450°C and sustained for 50min. Cast iron and bronze alloy were smelted in this system.

**Key word:** microwave oven, complex permittivity, carbon materials, smelting system, binchotan

### 1. はじめに

電子レンジは、良く知られているように電波による水分子の誘電加熱により食品の加熱、調理を行う器具である。しかし電子レンジによって、木炭が加熱される現象については一般にはあまり知られていない。最近の報告によれば<sup>1), 2)</sup>, 電子レンジ中に置いた木炭が発熱することを利用して、1000°Cに近い高温が得られるとされる。これを利用して各種金属を溶解し、合金作りなど冶金学の教材化が提案されている<sup>2)</sup>。また、MORITA<sup>3)</sup>らによれば、スラグとカーボンの混合物をマイクロ波加熱して1700°Cを得たという報告もある。

ここで、断熱材などを工夫して到達温度を高めてやれば、融点の高い材料である青銅・鉄などの溶解も電子レンジ内で手軽に行えるようになる。そこで各種炭素質（黒鉛・備長炭・マンガローブ炭など）について粒度や使用量、断熱材との組み合わせなど、

加熱条件と昇温の関係を詳しく調べた。その結果、1400°Cを超える高温が短時間の加熱で得られ、持続時間も十分長いことがわかった。これらを踏まえて、鉄・青銅合金を溶解し、具体的な鋳物作りを行ったので、それについても報告する。

### 2. 加熱装置の構成

既報<sup>2)</sup>を参考にして、外るつぼ（容積126ml）と内るつぼ（緻密質アルミナ製、容積37ml）の二重構造とし、その間に木炭を挿入する。その後、内るつぼと外るつぼのすき間、上部5mm深さにアルミナファイバーを詰めて木炭の飛び散りを防止するとともに、酸化を抑制した。更に、それらの断熱のために、本実験では外るつぼの外側をアルミナファイバーで囲った。るつぼ上部には熱電対挿入用に穴（φ5mm）をあけておいた。

これを家庭用の電子レンジ（電波出力170W, 500W, 700Wの3段切り換え、庫内容積16ℓ, National製）に入れて木炭を加熱すると、その熱が内るつぼに装てんされた金属に伝わり、溶解が起こる仕組みである。

外るつぼとしては当初緻密性の高いアルミナるつ

2005年11月30日受理

\*新潟大学教育人間科学部

\*\*新潟大学教育人間科学部学生

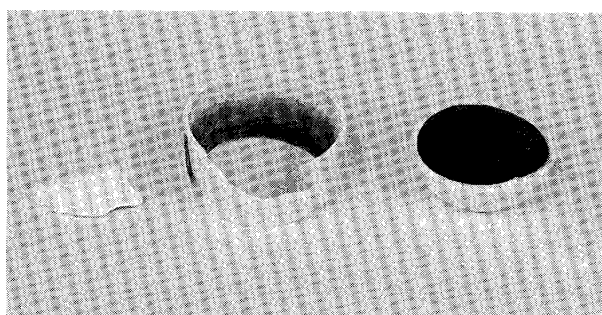


図1 熱衝撃で割れた緻密質アルミナるつぼ  
(外るつぼ)

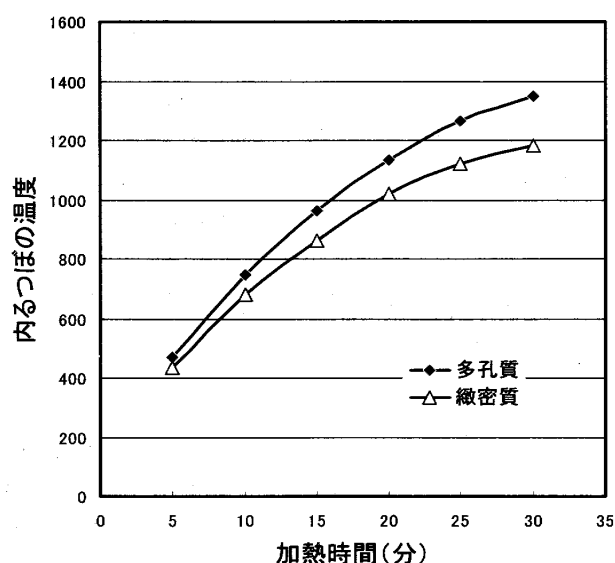


図2 外るつぼの材質による到達温度への影響

ぼを使用していたが、熱衝撃による割れが見られた事(図1)や比熱が大きい事から、耐火レンガ(「ISOLITE LBK3000」耐熱温度1800℃)をくり抜いて自作した外るつぼ(多孔質)を使用するようにした。この場合、熱衝撃によるひび割れは見られず、しかも昇温速度が向上した。図2は外るつぼの材質による昇温速度への影響を調べたもので、乾燥状態の備長炭(粒径2.22~5.86mm)を20g使用し、500Wで5分加熱することにより内るつぼの温度を測定した結果である。前述のように、多孔質外るつぼが緻密質外るつぼより昇温速度が向上する事を示している。

上記の温度測定には熱電対を用いているが、電子レンジ内ではマイクロ波照射によって熱電対自体が加熱され、正しく温度表示ができないため、連続測定ができない。そこで、一定時間加熱してから装置全体を取り出し、その都度熱電対を挿入し、温度測

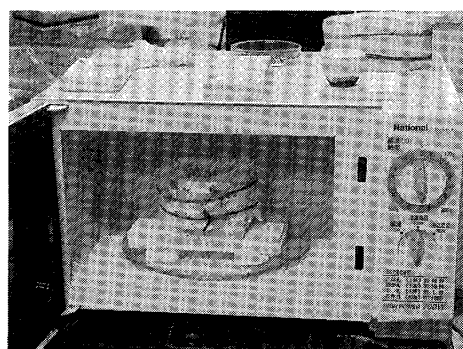


図3 電子レンジ内での加熱装置の様子

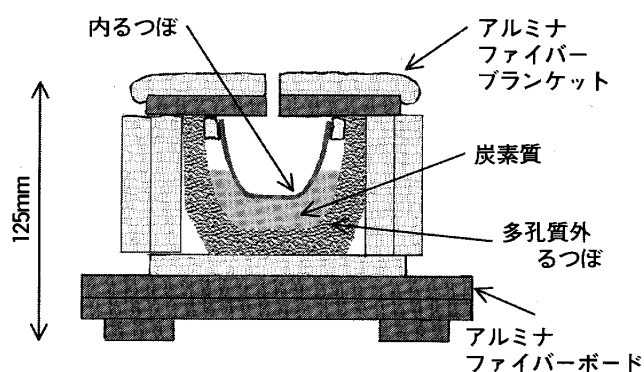


図4 加熱装置の断面図

定を行うという断続測定を行った。挿入直前の熱電対は室温になっているので、挿入によりるつぼ内の温度は当然低下する。従って、本実験で測られたるつぼの温度は、実際より低い値となっている事に注意が必要である。

また、加熱装置を電子レンジで加熱すると、レンジ庫内の温度も上昇する。天井部分が最も熱くなり、次いでガラステーブル、側面及び底面の金属部分が暖まった。天井部分やガラステーブルは高いときには60℃程度にまで上昇をするが、殆どの場合、40℃程度に留まった。図3は内部の様子が見やすいように加熱装置の蓋をはずし、電子レンジに入れた様子である。内るつぼが1000℃を超えても、土台となるアルミナファイバーボードの部分は素手でもさわる事ができる(40℃程度)。温度測定の際には、この土台部分をつかみ、レンジ庫内から加熱装置を取り出した。加熱装置の構造については、図4にその断面図を示した。装置の高さは、取り出しやすさなども考慮に入れて、125mmとなっている。なお、炭素質の装てんの際には、内るつぼの底面に10g、残りを側面に均等に使用することにした。

表1 炭素質の基礎データ

	かさ密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸湿率 (%)	体積抵抗率 (Ω・m)	誘電率	
				ε'	ε''
黒鉛	1.53	0.14	$1.0 \times 10^{-5}$	4.37	0.139
竹炭	0.6	12.3	$9.0 \times 10^{-3}$	1.81	0.088
活性炭	— (*1)	29.3	— (*1)	3.37	0.125
備長炭	0.84	12.5	$8.9 \times 10^{-5}$	3.33	0.115
マングローブ炭	0.82	7	$7.2 \times 10^{-2}$	1.66	0.042

(\*1) 活性炭は粉末状であるため測定困難につき省略

### 3. 実験に用いた炭素質の各種特性

実験で用いた各種炭素質について、かさ密度、吸湿率、体積抵抗率、誘電損失を測定した結果を表1に示す。かさ密度については炭素質を適当な直方体に切り出し、乾燥させた状態での重さと体積から算出した。吸湿率は室内で長時間放置し、十分吸湿させた炭素質を乾燥させ、その前後の重さの変化から吸湿量を求め、乾燥状態の重さをベースに算出した。体積抵抗率は、一様な断面積で、断面積に対して十分な長さをもつ炭素質を用いて4端子法で電気抵抗を測定し、電圧端子間の距離と断面積から算出した。誘電率は同軸プローブ法により測定した(メーカー名: Agilent)。表1からわかるように黒鉛以外は吸湿性が強く、誘電率測定の際に吸湿した水分が影響することが考えられたため、誘電率測定では炭素質(粒径0.65~1.01mm)を乾燥させ、室温状態で測定を行った。測定周波数範囲は電子レンジの周波数2.45GHzを考慮して、その前後の2.4~2.5GHzで行った。

複素誘電率は、

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$$

で表される<sup>4), 5)</sup>。

ここで誘電率 $\epsilon$ の実部 $\epsilon'$ は外部電界から材料へのエネルギー蓄積量をあらわすが、虚部 $\epsilon''$ は損失係数と呼ばれ、外部電界に対する材料のエネルギー損失を示す。

$\epsilon''$ の値が大きいものほど熱損失が大きくなるため、電子レンジ加熱における昇温は黒鉛が最も期待できる。その次に活性炭、備長炭、竹炭と続き、マングローブ炭が最も低い昇温になることが予測される。マングローブの値は極端に小さいが、他の4つ

の炭素質については、ある程度の昇温が期待できる。これらの予測を踏まえ、電子レンジでの加熱実験を行った。

### 4. 各種炭素質による加熱特性の比較

#### 4.1. 昇温速度と持続時間

各種炭素質について0.65~1.01mm(平均0.8mm)の粒径にしたものを各20g使用し、電波出力500Wで加熱した。以降の実験ではすべて、電波出力500Wで行った。5分毎に装置を電子レンジから取り出して熱電対を差し込み温度測定を行った。その結果を図5に示す。これによれば、マングローブ炭の場合は若干の温度上昇が見られるのに対し、備長炭では温度上昇が顕著であり、30分加熱で1400℃以上に到達する事が示される。また、竹炭や活性炭の昇温も備長炭に近い値を示し、三種類の炭素質で青銅や鋳鉄の溶解が十分可能である事が分かった。ここで

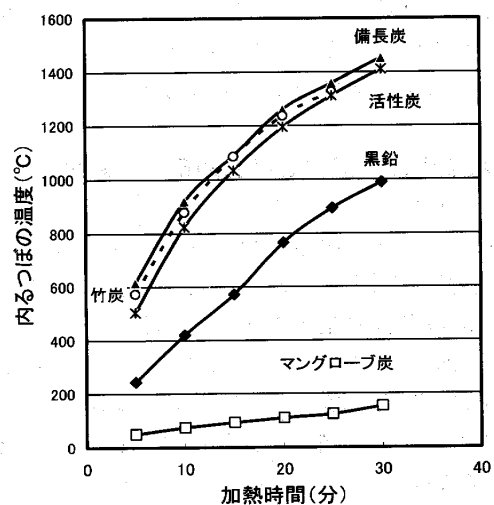


図5 各種炭素質の昇温速度の比較

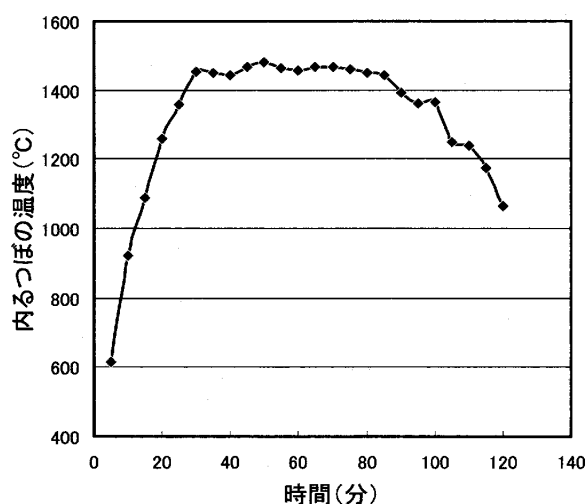


図6 備長炭(粒径0.08mm)を使用した  
内るつぼの加熱曲線

温度の測定時間は平均的に2分程度であり、この間にも熱が逃げてしまうため、熱電対挿入による温度の低下とあわせて100℃程度の温度降下が十分に考えられるので、実際には純鉄(融点1535℃)の溶解も可能な範囲にまで温度が上がっていると思われる。

一方黒鉛は昇温速度が前述の備長炭・竹炭・活性炭と比べて低くなり、誘電率からの予想とは異なる結果となった。これについての考察は後に述べるものとする。

また、備長炭で図5に引き続き長時間継続した時の温度変化について図6に示した。これによれば30分で1450℃に到達した後、80分まで50分間にわたり温度が一定に維持された。その後温度が低下し始める。この温度低下は炭の酸化・減量によって生じたものと思われる。従って本装置の場合、加熱時間は有限であるが、高温の持続力が長いので実用金属の溶解炉として有効であると言える。

#### 4.2. 粒径の変化による昇温曲線への影響

備長炭・マンガローブ炭・黒鉛の三種類において、粒径を変化させた場合の昇温速度の変化を調べた。

図7, 図8, 図9はそれぞれ備長炭, マングローブ炭, 黒鉛の場合の結果を示す。備長炭(図7)では粒径を細かくすることで、より大きな昇温速度が得られるが、黒鉛(図9)では逆に昇温速度が低下し、マンガローブ炭(図8)は昇温速度に大きな変化が見られない。

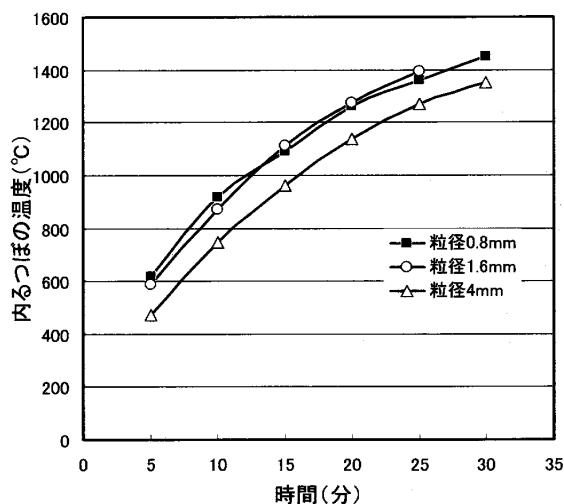


図7 備長炭の粒径と昇温速度との関係

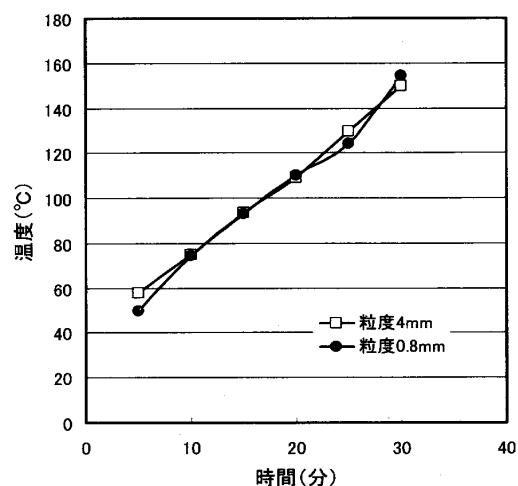


図8 マングローブ炭の粒径と昇温速度との関係

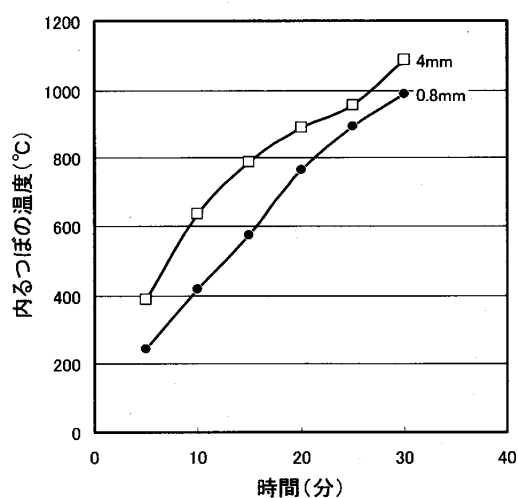


図9 黒鉛の粒径と昇温速度との関係

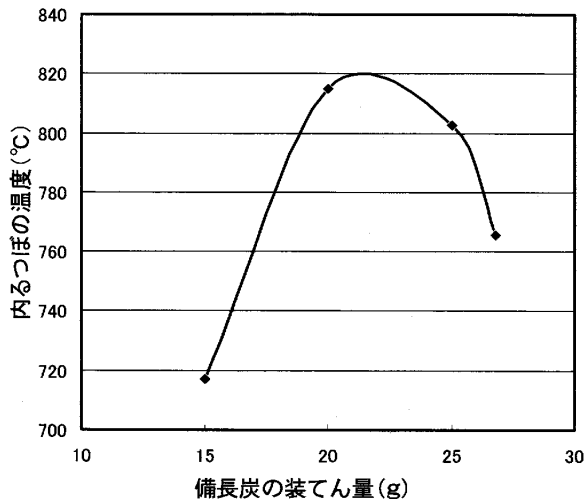


図10 備長炭の装てん量と昇温速度との関係

#### 4.3. 炭素質の使用量と昇温速度との関係

図10は使用する炭の最適量を調べたもので、粒径2.22~5.86mmの備長炭を乾燥させ、15g、20g、25g、26.8gをそれぞれ加熱装置に装てんし、500Wで10分間加熱した結果である。これによれば、20gでの昇温速度が最も高く、それ以上使用量を増やすと逆に昇温速度が低下した。

#### 4.4. 加熱特性についてのまとめと考察

図5で示されたように、黒鉛は $\epsilon''$ の値が大きいにもかかわらず、昇温速度が低かった。これは黒鉛の電気抵抗が極めて低く（表1参照）金属的な性質をもっているため、電波を反射するからではないかと考えられる。外部からのマイクロ波は、外るつぼに面している黒鉛に反射され、それ以上マイクロ波が侵入できない。そのためマイクロ波の当たる部分だけの昇温しか得られない。粒径を細かくすると、粒と粒の間のすき間が小さくなり、マイクロ波の中への侵入が更に困難になると共に、マイクロ波が照射される面積も狭まるので昇温も小さくなったものと思われる（図9）。

備長炭では粒径を細かくすることで高い昇温が得られたが（図7）、これは粒径を細かくする事で接触点が増え、接触部での発熱が相乗する効果があったのではないかとと思われる。また、マングローブ炭の発熱が最も小さかったのは、単純に $\epsilon''$ が小さいためとしてよいと思われる。

当初の予測では竹炭は $\epsilon''$ の値が比較的低くかったにもかかわらず、備長炭や活性炭とよく似た昇温曲線を描くことが分かった。これについて詳しいこ

とは不明である。誘電率の測定は限られたサンプルに対して行ったので、サンプル数を多くして再確認をする必要がある。

次に、木炭の装てん量に最適値があるという結果（図10）について考える。15gの使用では内るつぼに接する面積が小さいため、加熱効率が悪く昇温速度が低くなったものと思われる。また、20g以上の炭を使用した場合にはマイクロ波が炭全体に分散してしまい、単位面積あたりの発熱量が下がるため昇温速度が低下したと考えられる。

これらについてのまとめをすると、①電子レンジでの加熱では $\epsilon''$ の値が一定以上で、マイクロ波を反射しない炭素質（備長炭・活性炭・竹炭）が発熱体として適している。②備長炭の場合、到達温度は1450℃に達し、かつ50分の持続が可能である。③備長炭では粒径を小さくすることで昇温速度が向上するが、その場合持続時間の点で不利になるものと思われる。④本装置構成における備長炭の最適装てん量は20gである。

### 5. マイクロウェーブ溶解装置の応用

#### 5.1. 鋳鉄の溶解

図5から備長炭・竹炭・活性炭の昇温速度はいずれも大きく、同様な昇温曲線が得られた。これらの内、価格の面では備長炭が最も安いので、以下の溶解実験ではこれを使用することにした。また、粒径の影響（図7）では、粒径0.8mmと1.6mmとでは差が見られなかったため、粒径の大きい1.6mmを使用することにした。木炭の使用量は図10を参考にして最適量の20gとした。

図7よりこの加熱装置を使用して、1400℃以上に温度が上がることは確認できた。しかし、地金を加熱・溶解する場合、余分なエネルギーが必要になるので、実際に地金の溶解ができるかどうか調べる必要がある。そこでまず始めに、融点1150℃である鋳鉄を溶解することにした。素材にはネズミ鋳鉄4種（JIS FC250）を用いた。この鋳鉄を内るつぼに43g装てんし、5分加熱するごとに加熱装置を取り出し、R熱電対を挿入して内るつぼの温度を測定した。

図11は溶解前の鋳鉄の様子である。これを電子レンジで加熱した結果、20分間の加熱で内るつぼが1100℃に到達した。さらに加熱時間が30分になると溶解が確認できたので、これを金型に流し込んだ。

図12は鋳鉄を流し込んだ直後の様子であるが、るつぼや溶解した金属の色から十分温度が上がっている

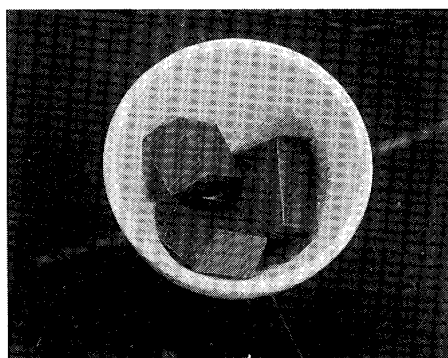


図11 内るつぽに装てんした鑄鉄

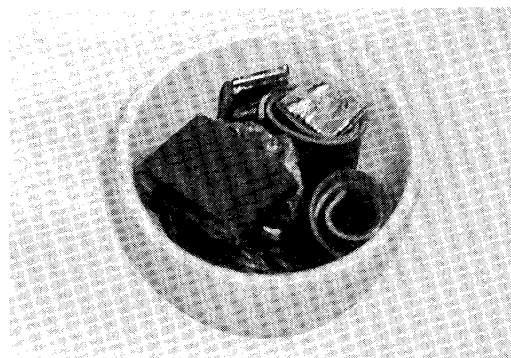


図13 10%青銅合金の作成（銅66.1g，錫7.3g）

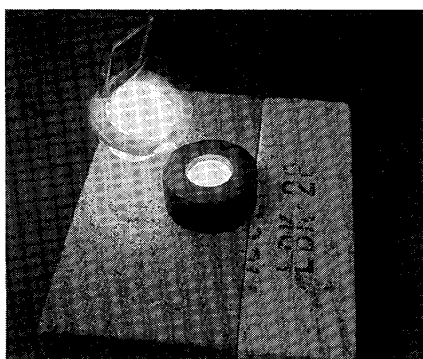


図12 鑄鉄の鑄込み

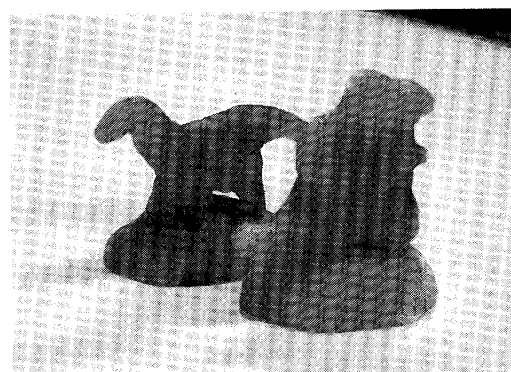


図14 ロストワックスの原型

ことが確認できる。

以上の事より、電子レンジで鑄鉄の鑄物作りを行うことが可能である事が示された。

## 5.2. 青銅合金の溶解と鑄物作り

次に銅と錫の合金である青銅を作り、小形の鑄物作りを行った。内るつぽの容積を考慮すれば、一度に溶解が可能な体積はおおよそ15mlであるため、この範囲で収まるような原型を作った。

鑄込みには10%青銅合金（融点1010℃）を使用することにした。銅と錫を図13の様に内るつぽに装てんし、加熱装置にセットして溶解を行う。装てんした材料のすき間が多いため、15mlに満たない量であるにも関わらず、内るつぽの縁一杯になった。これ以上の地金を溶解する際には、材料を途中から継ぎ足す方法を取る必要がある。

図14はロストワックス（比重0.97）で作製した鑄物の原型である。二つ合わせて8.4mlの体積で、1回の溶解で鑄込みが可能である。この原型を鑄物用せっこうに埋没させ、自然乾燥の後、木炭コンロで



図15 青銅鑄物作品

強制乾燥及び、脱ろうを行った。図13のような金属地金を加熱装置にセットし、20分間加熱し続けた所、完全に溶解したので、予め300℃程度に予熱しておいたせっこう鑄型に注湯した。図15にはできあがった青銅作品を示す。ロストワックス原型とほぼ同じものができあがった事が示されるが、注湯温度がやや低めであったためか、湯が完全に流れておらず不完全な部分も見られた。

## 6. 結 論

電子レンジにおけるマイクロ波の照射によって木炭が発熱する事を利用し、金属を溶解する装置を試作した。アルミナるつぼを内外の二重構造とし、その間に炭素質を装てんし発熱体とする。炭素質が発する熱が内るつぼに伝わり、るつぼ内の金属を溶解する仕組みであるが、これだけでは十分な昇温を得られないため、アルミナファイバークラッドで周囲を覆い、断熱を強化した。これにより、内るつぼの昇温速度が向上した他、炭素質の酸化も抑えることができた。黒鉛、竹炭、活性炭、備長炭、マンガローブ炭の5種類をそれぞれ加熱装置に装てんし、市販の電子レンジで加熱したところ、竹炭、活性炭、備長炭では30分で1400℃に到達した。ここで、備長炭を使って粒径や装てん量の変化による昇温速度の変化を調べたところ、粒径を細かくすることで昇温速度が増す傾向が現れ、また装てん量には最適値があることが分かった。高温の持続時間については、粒径0.8mmの備長炭で約50分間1450℃を維持する事

ができた。また、電子レンジ加熱での昇温速度は、誘電損失の値が大きい炭素質を装てんした場合に高くなることが分かった（黒鉛を除く）。この加熱装置を用い、地金の溶解を実際に行なったところ、融点1150℃の铸铁43gが30分で溶解し、73gの10%青銅合金であれば20分で溶解が確認できた。よって、市販の電子レンジを用いて実用金属を溶解する事は十分に可能であることが示された。

## 参 考 文 献

- 1) 加藤識泰：化学と教育 7, (2002), p.510-512.
- 2) 藤田繁治：愛媛県総合科学博物館研究報告, (2003), (8), p.1-5.
- 3) K.MORITA, et.al.: ISIJ International, 41 (2001), p.716-721.
- 4) 越島哲夫ほか：マイクロ波加熱技術集成, 株式会社エヌ・ティー・エス (1994), p.4-10.
- 5) Metaxas A.C and Meredith R.J: Industrial Microwave Heating, Peter Peregrinus Ltd. London U.K. (1983), p.27.