

令和 5 年 5 月 23 日現在

機関番号：53203

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03130

研究課題名（和文）学校のゴミから回収した金の精錬および鑄造実験教材の開発

研究課題名（英文）Development of training materials for refining and casting of gold collected from school waste

研究代表者

河合 孝恵（KAWAI, Takae）

富山高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：60271491

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：実験室レベルでの金の精錬方法についての実験手法を確立し、実際に学校のゴミから純金を精錬することに成功した。安価なコンピュータ数値制御(CNC)加工機を用い、カーボン板から鑄型を作成する手法を確立し、安価に鑄型を作製することに成功した。石英試験管を用いた新たな鑄造方法を開発し、安全かつ材料の無駄なく金メダルを鑄造することに成功した。開発した新規鑄造方法では、鑄型内の金が溶融する瞬間を確認することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでゴミからの金の回収・精錬・鑄造方法は、その情報が企業内で閉じており、個人で行うことが難しい現状であった。しかし本研究成果により、一個人で、実験室レベルで、安価に、安全に、ゴミから金を回収・精錬・鑄造するプロセスが確立され、実際に学校のゴミのみから金メダルを作成することに成功した。また金が溶解・還元・溶融する様子や、金メダルが鑄造される様子等は非常に人々の関心を引き付け、魅力的な化学コンテンツであるため、公開実験等で利活用を行うため、静止画や動画に記録した。この研究成果により、新たな魅力ある楽しく夢のある実験・エコ活動が創成された。

研究成果の概要（英文）：Experimental methods for refining gold at the laboratory level were established, and pure gold was actually refined from school waste. A method was established for making molds from graphite plates using inexpensive computer numerical control (CNC) machines, and the mold was made at a low cost. A new casting method using quartz test tubes was developed, and gold medals were cast safely and without material waste. In the newly developed casting method, the moment when the gold inside the mold melts has been confirmed.

研究分野：金属リサイクル

キーワード：金 精錬 鑄造

### 1. 研究開始当初の背景

ゴミから回収された金の活用については、東京オリンピックの金メダルに関する報道等により一般的に広く知られている。また金貨価格の上昇の影響もあり、工業的なリサイクルもより活発に行われている。

しかし、金の製錬方法については、工業的な観点からの報告は見られるものの、還元剤の濃度や反応温度等の精錬工程を詳細に示した報告はほとんどない。

一般的な金の鑄造方法は、金の融点(1064℃)よりも数百度高い温度で溶融し、石膏製の鑄型に流し込む方法がとられている。しかし、この方法は 1300℃程度の温度を必要とするため、一般的な電気抵抗型の電気炉は使用できず、高周波誘導炉が必要となる。石膏製の鑄型は 1 回毎に破壊するため再利用することができない。金を流し込む口(湯口)が必要となるため、製品より多くの金が必要となる。石膏は、金の融点では有毒ガスが発生するため電気炉内で直接鑄造することができない、などの欠点を有する(表 1)。カーボン鑄型を用いた鑄造は鑄型の製作が難しいものの、従来の鑄造の欠点を解消する方法である。しかし実験室レベルでのカーボン鑄型を用いた金の鑄造方法について報告した例はない。

表 1. 鑄造鑄型比較

	石膏	カーボン
鑄型製作容易さ	○	×
酸化	○無	×有
価格	○安	×高
金の無駄(湯口)	×有	○無
使用回数	×1 回	○複数
溶融温度	×高	○低
一般的な電気炉	×不可	○可
有毒ガス	×有	○無

### 2. 研究の目的

本研究では、実際のゴミから回収した金を、実験室レベルで製錬および鑄造する方法を開発し、広く社会に知られることにより、これまでにない、新たな魅力ある楽しい実験・エコ活動を創成することを目的とする。

金の精錬は、実際にゴミから回収した金メッキ部分を王水法により精錬し、いくつかの還元剤を用い、金を還元し、実験室レベルでの最適な精錬方法を検討する。

一般的な金の鑄造は、抵抗線加熱型の電気炉が使用できない、鑄型を再利用することができない、湯口が必要となる、などの欠点を有する。そこで本研究では、鑄型材としてカーボンを用いる新しい鑄造方法の開発を行う。本研究で開発を目指している新規鑄造方法は、一般的な金の鑄造方法の欠点をなくし、鑄型を何度も利用可能とし、鑄造中に金が溶融した瞬間を外部から観察できるという、これまでにないメリットを有している。

### 3. 研究の方法

#### (1) 回収された金の溶融

廃棄パソコンから回収した電子基板から分離した薄片状の金試料の溶融について、一般的で安価なバーナーを用いた方法および電気炉を用いた方法について検討する。

#### (2) 実験室レベルでの金の精錬方法の確立

学校内で古くなり使用されなくなったパソコン等から回収した金メッキ部分等を王水に溶解し、純度を上げる操作を行い、純度を高めた塩化金酸塩水溶液を調製し、これまでに報告されているいくつかの還元剤を用いた還元処理について検討を行う。得られた金微粒子は電子顕微鏡を用いた観察を行う。また金微粒子の簡単な溶融方法についても検討を行う。

#### (3) カーボン材を鑄型として用いた新規鑄造方法の確立

##### (3-1) カーボン鑄型の酸化保護

カーボン製の鑄型は高温下で空気中の酸素と触れると酸化させてしまうため、鑄型の再利用回数が低下する問題が発生する。そこで鑄型の酸化保護について調べる。

##### (3-2) カーボン焼結による鑄型の製作

CNC 加工機による鑄型の製作は機械加工の知識が必要となり、化学系では難しい。そこでカーボン粉末を主材として、高分子材料を結合材として加え、カーボン鑄型を安価に製作する方法について検討を行う。

##### (3-3) CNC 加工によるカーボン鑄型の製作

本研究ではなるべく安価なものを用いて実施可能となることを目的としているため、なるべく安価な CNC 加工機を用いた鑄型の製作方法について検討する。

##### (3-4) 金メダルの鑄造

鑄造温度等について検討し、実際に金メダルを鑄造する。新規鑄造方法では、金が溶融する際、凸型鑄型が下降するため、溶融の瞬間を外部から知ることができるという大きなメリットがある。そこで鑄造中に動画撮影等を行いながら観察し、金が溶融し始める時間および鑄造が完了す

るまでの時間計測を行う。

(4) 実験の静止画・動画記録

金が王水に溶解する様子、金が還元される様子、金が溶融する様子、金メダルが鑄造される様子等は非常に人々の関心を引き付け、魅力的な化学コンテンツであるため、これらを静止画や動画に記録し、公開実験等で利活用を行う。

4. 研究成果

(1) 回収された金の溶融

廃棄パソコンから回収した電子基板から分離した薄片状の金試料の純度をエネルギー分散型 X 線分光法にて調べた結果、純度は 99 wt%以上であることが確認された。

そのため、精錬は必要ないと考え、薄片状の金試料のガスバーナーによる溶融を試みたが、試料が薄いため、飛散してしまい、溶融することができなかった。そこで電気炉での溶融を行った。しかし得られた試料は金光沢を有さなかった。これはエネルギー分散型 X 線分光法では試料表面の元素しか検出できないため、高い純度が観測され、深部の純度はそれよりも低いため、このような結果になったと考えられる。

したがって、精錬し純度を高める必要があることが判明した。

(2) 実験室レベルでの金の精錬方法の確立

金の精錬方法としては、王水法、青化法、灰吹法、水銀アマルガム法等があるが、青化法はシアン化合物を、灰吹法は鉛を、水銀アマルガム法は水銀を使用する。これらの方法は有害物質を利用・廃棄する点で好ましくない。そこで王水法による精錬を選択した。

薄片状の金試料(図 1)に王水を加え、完全溶解する容量について調べ明らかにした。ドラフト内、室温にて溶解実験を行ったところ、溶解に要した時間は 10 min 以内であった。その後、不純物を沈殿・

ろ過し、さらに純度を上げる操作を行い、純度を高めた塩



図 1. 薄片状の金試料



図 2. 塩化金酸塩水溶液

化金酸塩水溶液(図 2)を調製した。

還元剤には金の還元を観察させる演示用として、還元速度の速いものを用いた。その結果、還元反応は一瞬で起こり、黄色透明の塩化金水溶液が、金微粒子の生成により一瞬にして茶色く濁った(図 3)。これら一連の精錬操作による金の回収率は高い値となった。

得られた金微粒子(図 4)の電子顕微鏡写真を図 5 に示す。約 1  $\mu\text{m}$  ほどの凹凸表面を持った微粒子であることが明らかとなった。

また還元工程に時間がかかる還元剤を用いた還元剤を用いた実験も行った。その結果、約 10 分間かけてビュレットよりゆ



図 3. 金の還元反応



図 4. ゴミから得られた金微粒子

っくりと還元剤水溶液を滴下することにより、金微粒子が生成・沈殿し、反応の進行に伴って塩化金酸水溶液の黄色が薄くなり、最終的に透明になる様子が観察され

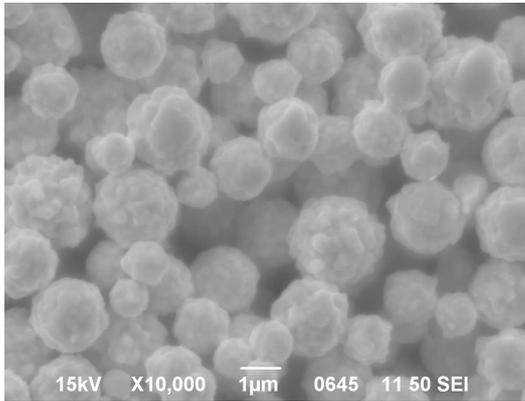


図 5. 金微粒子の電子顕微鏡写真

た。また回収率は高い値となった。鑄造実験にはこちらの還元剤を用いた金を用いた。

得られた金微粒子を簡単な方法により溶融するため、安価で入手が容易な一般的なガスバーナーを用いて溶融を行った。溶融に用いる試料の受け皿には、貴金属加工業界でチョコ皿と呼ばれる金属溶融用耐熱皿を用いて溶融を行った。ガスバーナー加熱でも金微粒子が飛散することはなく溶融が可能であった。加熱から約 1 min ほどで溶融が始まり 2 min 以内に完全に全て溶融した。その後放冷し、金の粒(図 6)を得た。最終的な回収率は高い値となった。

(3) カーボン材を鑄型として用いた新規鑄造方法の確立

金の融点は 1064 °C であり、この温度での耐熱性を有する材料としては石英やアルミナなどがある。しかしアルミナ管は多少通気性があり、内部のカーボン鑄型が酸化する可能性があるため、通気性を有さない石英ガラス試験管を用いることとし、図 7 に示す方法で鑄造することとした。

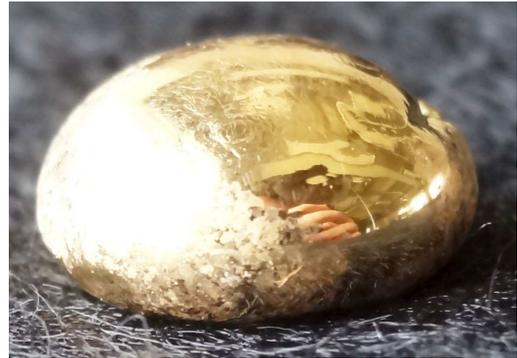


図 6. ゴミから得られた金の粒

(3-1) カーボン鑄型の酸化保護

石英ガラス試験管を 2 重にし、その中にカーボン鑄型を置き、鑄造を行うが、その際、2 重にし

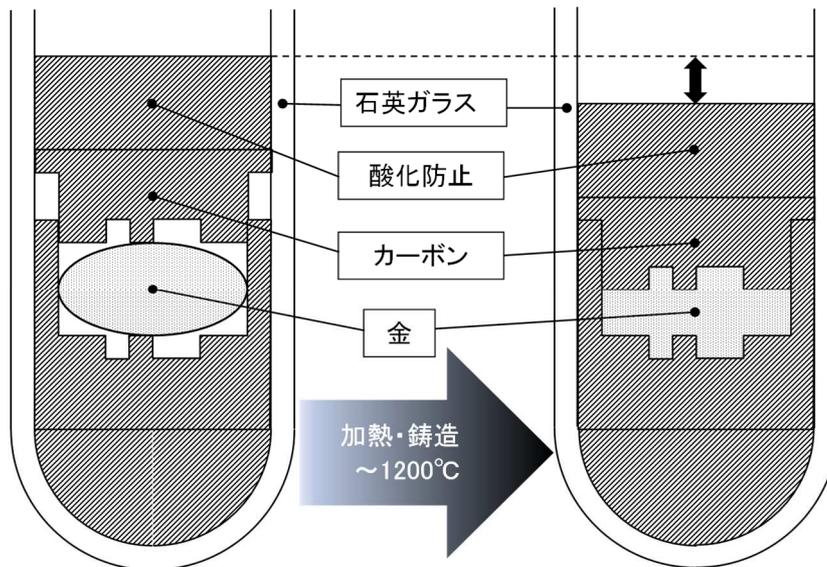


図 7. 新規鑄造方法

た石英ガラス試験管の隙間から酸素が入り、カーボン鑄型を酸化させてしまうため、鑄型の再利用回数が低下する問題が発生する。そこで鑄型の酸化保護についての実験を行った。2 重にした石英ガラス試験管の中に CNC 加工機を用いて、試験管内径に近い直径に切り出した厚さ 8 mm のカーボン板を複

数枚入れ、1200 °C で加熱し、加熱前後のカーボン板の重量測定から酸化度を調べた。さらに酸化を防止するため、カーボン板の上にアルミナ板を乗せ、2 重の石英ガラス試験管の上にパイレックス試験管を蓋として被せて酸素の流入を防ぎ、その酸化防止効果を調べたところ、いずれもほとんど効果が無いことが判明した。最終的に酸化防止としては、2 重にした石英ガラス試験管と 8 mm 厚のカーボン板 1 枚で十分であることが確認された。加熱酸化によるカーボン板の重量減少は、ほぼ加熱時間に比例し、最大でも 1 wt% 以下であったが、上部は少し浸食されていることが確認された。

(3-2) カーボン焼結による鑄型の製作

CNC 加工機による鑄型の製作は機械加工の知識が必要となり、化学系では難しい。そこでカーボン粉末を主材として、ポリビニルアルコール(PVA)を結合材として加え、カーボン鑄型を安価に製作する方法について検討を行った。PVA 水溶液濃度について検討した結果、濃度が高い場合、粘着力が強く型に付着するため成型が困難となり、濃度を中程度とした場合、常温乾燥後の変形が見られ、最終的に低濃度の最適条件が特定された。乾燥および炭化するための加熱温度および時間についても様々な組み合わせで検討を行い、ほぼ最適条件を見つけるに至った。しかし実際

に作成可能となったものは円柱状の形状までで、本手法では鋳造に使用できるような凹凸型のものまでは製作することはできないとの結論に至った。

### (3-3) CNC加工によるカーボン鋳型の製作

本研究ではなるべく安価なものを用いて実施可能となることを目的としているため、加工に用いる CNC 加工機はなるべく安価なものを選択した。

CNC 加工にはスピンドルの回転の ON OFF や XYZ 座標を記述した G-code が一般的に用いられる。この G-code は一般的には JW\_CAD 等の CAD ソフトで図面を描画し、そのデータから NCVC 等

のソフトを用いて作成されるが、この方法では加工の自由度が低いため、本研究ではフリーのプログラミング言語である Processing で G-code を作成するプログラムを自作し、これを用いて G-code を作成した。文字の切削用 G-code は JW\_CAD にて文字の線画データを作成し、これを NCVC にて G-code に変換し、作成した。作成した G-code の確認はフリーソフトの NCVC を用いた。エンドミルは安価で一般的なものを用いて切削加工を行った。これらのエンドミルでは黒鉛は使用可能とされていないが、



図 8. 製作したカーボン鋳型

切削は可能であった。しかし刃の摩耗が早いため、切削量の多いエンドミルは 1 回で使用不能となる。切削油等は用いずドライでの切削とした。

直径 16 mm φ のサイズの金メダルを作成することを目標として鋳型を設計した。鋳型の外径は一般的に入手可能なものの中で一番大きい石英試験管の内径が 19.1 mm φ であったため外径 19 mm φ とした。凸鋳型の細い円柱部分は直径 15.9 mm φ、長さ 6.2 mm とし、凹鋳型の内径は直径 16.0 mm φ、深さ 7.0 mm とし、空隙部分が直径 16.0 mm φ、厚さ 0.8 mm となるように設計し、製作した(図 8)。

### (3-4) 金メダルの鋳造



図 9. 空冷の様子(左端: 直後, 右端: 空冷後)

1200 °C に設定したカンタル線使用の電気炉に石英管を入れ、5 分間加熱静置後、取り出し、送風下で空冷後(図 9)、試料を取り出した。

新規鋳造方法では、金が熔融する際、凸型鋳型が下降するため、熔融の瞬間を外部から知ることができるという大きなメリットがある。そこで電気炉に、石英管に入れた鋳型を入れて動画撮影しながら観察した結果、鋳型を入れて

約 4 分後に凸型鋳型の下降が始まり、約 20 秒かけて下降が完了した。この結果から鋳型中で金は比較的ゆっくりと熔融し、鋳造されることが確認された。

図 10 に新規鋳造方法で鋳造を行った金メダルの写真を示す。鋳造結果は良好で、鋳型に彫った文字がしっかりと確認できることがわかる。金メダルと鋳型との離れも良好であった。

鋳造後、鋳造前後の鋳型の重量を測定し、酸化していないかを確認したところ、重量減少は全く見られず、また表面の劣化等も全く見られないことから、鋳型の酸化防止方法として本実験で採用した方法が有効であったことが確認された。

### (4) 実験の静止画・動画記録

金が王水に溶解する様子、金が還元される様子、金が熔融する様子、金メダルが鋳造される様子等を多数の静止画および動画で記録を行った。



図 10. 一個人で学校のゴミから作製した金メダル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 河合 孝患
2. 発表標題 演示を目的としたゴミから回収した金の精錬実験
3. 学会等名 日本化学会 第102春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 河合孝患
2. 発表標題 夢のあるエコ活動の創成を目指した学校から出たゴミからの金の回収実験の開発
3. 学会等名 日本工学教育協会 第67回工学教育研究講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河合孝患
2. 発表標題 夢のあるエコ活動の創成を目指した 学校から出たゴミからの金の回収実験の開発 - 演示を目的とした金メダルの新規鑄造実験の開発 -
3. 学会等名 日本工学教育協会 第70回年次大会・工学教育研究講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------