

飲料用アルミニウム空き缶の溶解と鋳造

～ 資源およびエネルギー学習題材としての検討～

古谷 吉男* 宮本 隆** 本田 勇人***

(平成22年10月29日受理)

Melting and Casting of Aluminum-can for Teaching Materials
on Natural Resources

Yoshio FURUYA* Takashi MIYAMOTO** Hayato HONDA***

(Received October 29, 2010)

1 はじめに

石炭、石油および天然ガスなどのエネルギー資源やハイテク産業に求められる稀少金属資源等は、安全保障上の戦略的観点から国家間交渉に利用されることが多いが、一方で、地球環境の保全や諸資源の有効活用を図る立場からの多くの提言やそれらを踏まえた取組みがなされつつある¹⁾。このような諸資源の世界的な動きを理解することは、今後の技術開発の世界的動向や産業、経済活動を含めた国際情勢を理解することにつながり、学校教育において教科を超えて求められている学習課題の一つである。そのような学習への発展的展開を視野に入れる中で、技術科教育の実践を通して、まずは、子どもたちに地球環境を意識しつつ、資源やエネルギー問題をより身近に実感させ得る学習の場を提供することは極めて重要である。

周知の通り、アルミニウムは我々にとって極めて身近な金属素材の一つであり、その優れた諸特性と軽量で加工性の良さことから生活や産業のあらゆる場面で利用されている。その製造は、工業的には酸化アルミニウム(アルミナ)を主体とするボーキサイトから融解塩電解法により大量の電気エネルギーを用いて製錬、精製されるが、現在では、リサイクル技術がほぼ確立されており、多くは再利用が図られている。

本稿では、中学校技術科における実践を想定し、資源やエネルギーを身近に実感させ得る材料加工領域の学習題材として、飲料用アルミニウム缶の製缶およびリサイクルを意図した空き缶の溶解と鋳造加工への発展を含めた教材化への手順と意義について検討した。

2 アルミニウム地金(再生地金)の製造とリサイクルの意義

融解塩電解法によりボーキサイト($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)からアルミニウム地金を製錬、製造

*長崎大学教育学部 **長崎市立高島中学校(講師) ***佐世保市立日宇中学校(教頭)

する場合、消費エネルギーは約146.4GJ/tとされており、鉄鋼の約0.83GJ/tに比べ環境への負荷が非常に大きい。しかし、アルミニウムの空き缶や廃材等を回収、再熔融、組成調整等の処理後、地金として再利用（再生地金）することで消費エネルギーも約4.42GJ/tに止められ、地金製造に要するエネルギーの97%が節約できる^{2,3)}。

図1は、日本国内における近年のアルミニウム空き缶の消費・回収量とリサイクル率の推移を示す。リサイクル率は70%台から年々増加傾向にあり、平成21年度には93.4%と、世界トップクラスの値を誇っている²⁾。資源の少ない日本においては、このような処理技術を含めたリサイクルシステムの確立は、天然資源の消費を前提とした技術立国を目指す上で不可欠な要素となる。

アルミニウム空き缶の溶解とそれに続く鋳造（再生地金製造）の学習は、エネルギー消費を含めたアルミニウム空き缶の再資源化の過程を身近に実感するのみならず、そこに付随する諸事象は、物質認識への発展、あるいは、その応用としても位置付けられ得る非常に優れた学習題材だと言える。

以下に、製缶技術の概要とアルミニウム空き缶の溶解および鋳造（地金製造）の手順や溶解設備等について、公立学校等での実践を想定し、検討した結果を述べる。

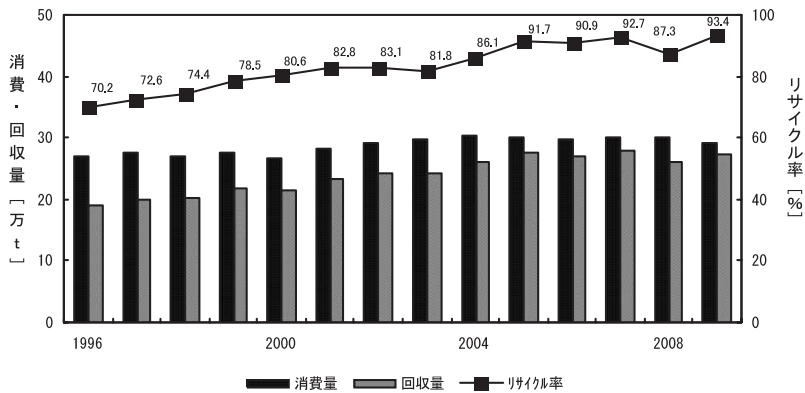
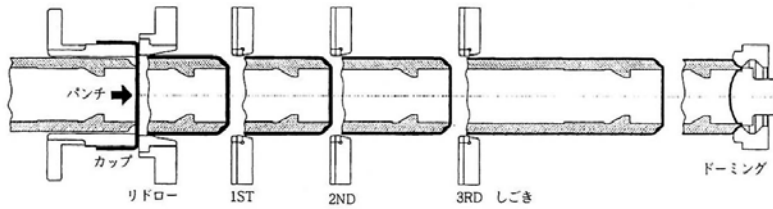
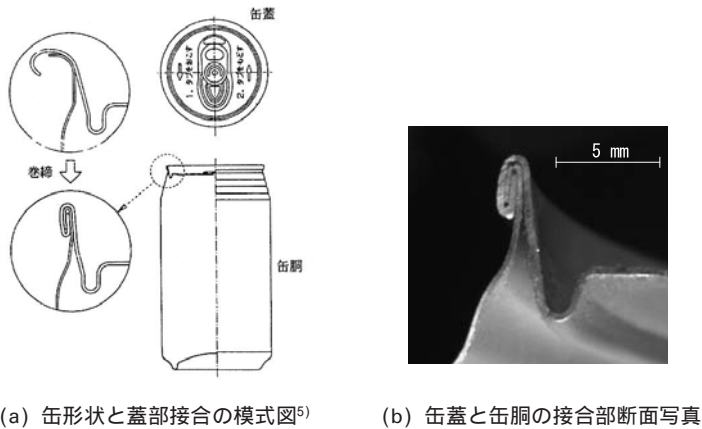


図1 アルミニウム空き缶のリサイクル率の推移²⁾

3 製缶技術と缶の構造と材料

製缶は、19世紀初頭、欧州で食料保管容器としてブリキ缶が考案された。中期には滅菌、無菌処理が導入され、かつ、缶詰製造の機械化が始められている。我が国には明治4年（1871年）にデュリー（フランス）の指導により長崎の松田雅典が「いわし油漬缶詰」を初めて試製、その後、「漬物缶詰」（山田箕之助 1874年）、「桃缶詰」（沢柳左吉 1875年）、「トマト缶詰」（大藤松五郎 1876年）が試製され、さらに、みかん、パイナップル、かに、チェリー、サケ等へと拡大して来た。国産のブリキ製缶は1923年以降である⁴⁾。

プレス加工による缶の胴部と底部を一体加工した2ピース缶は20世紀半ばにアメリカ合衆国で開発され、それ以降、1970年代にかけて鋼板（スチール）やアルミニウムの缶用材料の開発と相俟って、深絞りとしごき加工によるDI（Drawing and Ironing）缶や、絞りとしごき加工によるDR（Drawing and Redrawing）缶の量産を含めた製缶技術が確立する。図2にDI加工の概念の一例を示す。

図2 缶胴の深絞りとしごき（Drawing and Ironing）加工の概念図⁵⁾(a) 缶形状と蓋部接合の模式図⁵⁾

(b) 缶蓋と缶胴の接合部断面写真

図3 アルミニウム2ピース缶（350ml）の標準的な形状と蓋部の接合

現在、飲料缶にはスチール缶とアルミニウム缶がある。また、構造は、前述の2ピース缶と、蓋部、胴部および底部の3部分に分離する3ピース缶とがある。アルミニウム缶は殆ど2ピース缶であり、我が国では飲料缶全体の半数以上を占めている。アメリカ合衆国では飲料缶は殆どアルミニウム缶である。標準的なアルミニウム2ピース缶（350ml）の形状および缶蓋部と缶胴部との接合の模式図と実際の断面接写写真の一例を図3に示す。

製缶用アルミニウム板材（米国規格）は、その強度と加工性のため、缶胴材（3000系）、缶蓋・タブ材（5000系）で異なる組成を持つものが使用されている。リサイクル時にこの組成差が課題となり、両者を同一材質にするユニアロイ化も試みられているが、現状では、多くはリサイクル時に組成調整を行うことにより対応されている。また、缶の肉厚も徐々に減少し、標準的なアルミニウム2ピース缶（350ml）の重量は1979年から1990年の間に20.7gから25%減の15.35gになり、缶胴部の最薄肉部は0.132mmから0.103mmまでに至っている⁶⁾。経済原理に沿った技術革新を読み取ることが出来る。

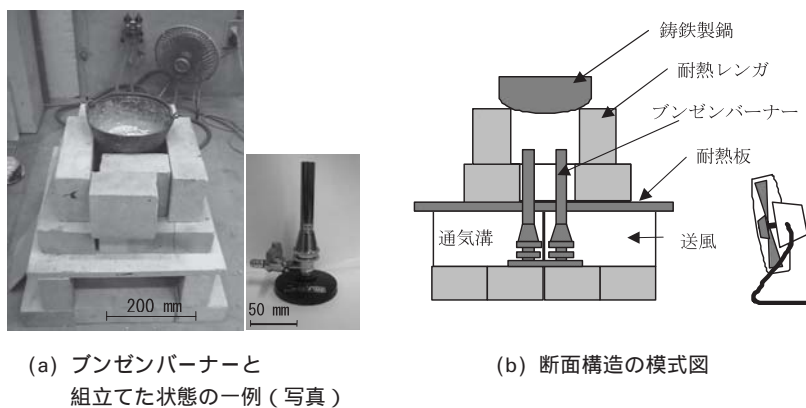
缶の内外面は安全衛生と装飾のために塗装と印刷が施されている。塗料樹脂としては、内面（一層）にはエポキシフェノールやエポキシアクリル等が、また、外面には、印刷のための下地となる第一層のホワイトコート用としてポリエステル、アクリルエポキシ、エポキシエステルアミノ等が、さらに、最外面の仕上げ用ニスとしてアクリルアミノ、ポリエステル、ポリエステルアミノ等が使用されている⁷⁾。印刷はホワイトコート上に施され仕上げ用ニスにより保護されている。

4 自作したアルミニウム溶解用の炉の構造と特徴

アルミニウムのリサイクル過程を実感させる授業を実践するためには、そのための溶解炉が必要となる。純粋なアルミニウムの融点は660 であるが、実用のアルミニウム合金ではさらに低くなる。学校教育現場での実践を想定し、溶解用の炉は、都市ガス（プロパンガス）をブンゼンバーナーにより燃焼させ、鉄製あるいはステンレス製の炊事用鍋を溶解鍋として用い、その底部を加熱する方式を構想した。用いるブンゼンバーナーの本数は溶解鍋のサイズにより決めることになる。

図4に今回自作した溶解炉とその構造の模式図を示す。炉本体は耐火レンガによる組み立て式であり、使用する溶解鍋に合せた調節や、不要時の撤去が可能である。4本のブンゼンバーナーを適正な間隔で固定し、バーナーのガス導入部や火力調節部の異常加熱を防ぐために炉本体下部は通気構造にするとともに、石膏ボード等の耐熱板を隔てて燃焼室を設けるようにした。経費は、ブンゼンバーナーの新規購入を伴っても1万円を超えない程度に押さえることが可能である。使用した材料とその数量等を表1に示す。

溶解用の鍋としては、市販のステンレス製と安価な铸铁製（南部鉄製）の鍋を用いて試みた。繰返し使用後の溶解用の鍋の様相の例を図5に示す。ステンレス製の鍋は、加熱時間の短縮は図れるものの、繰返し使用により同図(a)に示すような鍋底の溶出が認められた⁸⁾。アルミニウムとの合金化によると思われる。一方、南部鉄製の鍋はやや肉厚



(a) ブンゼンバーナーと組立てた状態の一例（写真）

(b) 断面構造の模式図

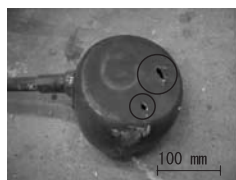
図4 自作の溶解炉

表1 自作の溶解炉本体の製作に使用した材料と数量

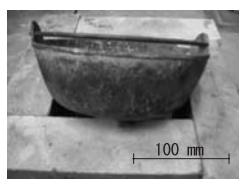
品名, 材料等	規格, サイズ等	数量
耐火レンガ	115 × 230 × 65 mm	20個
耐熱板（石膏ボード）	400 × 400 × 18 mm	1枚
ブンゼンバーナー	都市ガス用（16 mm）	4本
三方コネクター（ガス用）		2個
ガス用ゴムホース	9 × 15 mm	5～7m

表2 溶解炉各部の温度(室温16)⁸⁾

炉の部位	温度
溶解鍋の受炎部	970
耐熱レンガ内側面(バーナー火口部付近)	200
耐熱板上面(燃焼室内)	100
耐熱レンガ外側面(炉上部)	80



(a) 穴が生じたステンレス製鍋底(印部)



(b) 鑄鉄製鍋の様相

(c) 鑄鉄製鍋の鍋底の亀裂例
(印部矢印)

図5 繰返し使用後の溶解用の鍋の様相

で加熱時間を要するが、酸化皮膜等により保護されるとともに、鑄鉄特有の表面地肌により、アルミニウム溶湯の凝固後の処理が容易になる利点があることが分かった。長期間、繰返し用いた鑄鉄製(南部鉄製)の鍋の一例を同図(b)に示す。繰返しの使用においてもアルミニウムの鍋への融着は殆どないが、同図(c)に示すように、稀に、鍋底に加熱と冷却の繰返しによる熱応力と材質の変化に起因した亀裂が生じることがある。

アルミニウムの溶融に必要な加熱状態を得るには、強いブンゼンバーナーの火力下で加熱(燃焼)開始から約20~30分を要するが、その時点での炉主要部の温度をクロメル-アルメル熱電対により測定した結果の一例を表2に示す。溶解鍋の受炎部は溶解に必要な温度に十分到達しており、鍋底はオレンジ色を呈している。

5 アルミニウム空き缶の溶解の実際とその手順

アルミニウム空き缶の溶解までの手順は、大きく、以下の4つの段階に区分できる。

- (1) ブンゼンバーナーの点火と火力調整
- (2) 溶解鍋の設置、位置調整と加熱
- (3) 缶の乾燥と潰したアルミニウム空き缶の投入
- (4) 酸化物除去等の溶湯処理

以下、各段階ごとの実践上の要点を概説する。

(1) ブンゼンバーナーの点火と火力調整

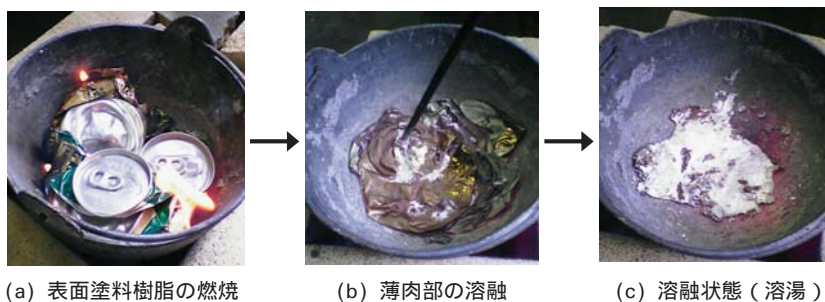
点火前にブンゼンバーナーのガス量および空気量調節ねじの確認を行い、点火には点火用の電子ライター（通称「チャッカマン」）を使うとより安全に点火できる。導入空気量を多くし、出来るだけ強い火力を得るとともに、全てのバーナーの火力が同程度になるように調節する。

(2) 溶解鍋の設置，位置調整と加熱

溶解鍋の鍋底にバーナーの炎の最も高温部が触れるように鍋の高さを調節する。この時、耐火レンガと鍋の接触位置を調節すれば良い。火力が十分であれば、20分程度の加熱で鍋底が800℃を超えたオレンジ色を呈してくる。炉本体下部の過加熱を防ぐために、扇風機等で送風冷却を行う必要があるが、この送風によりバーナーの炎が若干不安定になることがあるので注意を要する。

(3) 缶の乾燥と潰したアルミニウム空き缶の投入

溶解するアルミニウム空き缶は、洗浄後、十分乾かしたものをを用いる。特に、水分の残存は爆発等の事故に繋がる。空き缶は、それ自体による放熱を防ぐために、十分に潰した（折畳む）状態、すなわち、放熱面積を小さくした状態で投入する。投入後間もなく塗料樹脂の燃焼が始まり、当初、やや黒い煙と炎が上がる。若干の臭いも発生する。ダイオキシン等の有害物質は生じないが、屋外操業するか、屋内ならば換気の必要がある。その後、投入した空き缶が熔融温度に達するまで加熱を継続する。加熱時には、鍋上部から放熱もあるため、鍋に石膏板などを蓋代わり用いると時間の短縮が図れる。



(a) 表面塗料樹脂の燃焼

(b) 薄肉部の溶融

(c) 溶融状態（溶湯）

図6 アルミニウム空き缶の溶解過程の例



(a) 酸化物除去中の溶湯

(b) 酸化物を除去した溶湯

図7 アルミニウム空き缶から得られた溶湯の一例

(4) 酸化物除去等の溶湯処理

炉の安定した加熱状態が保たれていれば投入後15分程度の経過時間で缶の溶融が確認できる。適宜、かき混ぜることにより、安定な酸化皮膜に覆われた状態で個々の缶内部の薄肉部からアルミニウムの溶湯が出現する。鉄製の棒状用具で酸化皮膜を除去しつつ溶湯を集める。溶湯量をさらに増す場合は、この溶湯に触れるようにアルミニウム空き缶を追加投入し、これまでの手順を繰り返す。なお、ステンレス製用具での溶湯処理は厳禁である。前述したが、合金化により溶け出る。

以上の手順に従ったアルミニウム空き缶の溶解過程の実際の一例を図6に示す。

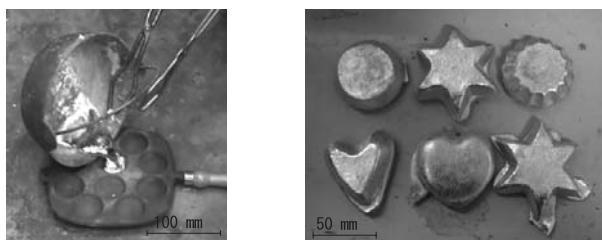
図7には溶湯中の酸化物処理の状況と処理後、鑄込みを待つ状態の溶湯の一例を示す。溶湯表面は空気に触れると直ぐに酸化される。必要以上の攪拌は禁物である。このときの溶湯の温度は730～760 程度になる。

6 アルミニウムインゴット（鑄塊、再生地金）の製造

溶解して得られたアルミニウム溶湯を鑄型に流し込み、再生地金としてのインゴットを製造する。興味関心を高めるために、この鑄型には鉄製の菓子用金属型（市販品）を利用すると良い。鑄込みの様子と製造したインゴット例を図8に示す。適宜、 tong やフック等を操作し、鍋から直接注湯しても構わない。鑄込み後の凝固したインゴットは、当分の間、非常に高温である。十分な注意を要する。凝固時に、インゴットの自由表面側には収縮による凹みが生じる。また、鑄肌は鑄型の表面状態の影響を受ける。

本手法と手順による場合のアルミニウムの回収率を評価するために、投入したアルミニウム空き缶の総重量と得られたアルミニウムインゴットの総重量の比較を試みた。

表3に示すアルミニウム空き缶を溶解して得られた2個のハート型インゴットと溶融過程で溶湯中から取出された酸化物を図9に示す⁹⁾。ハート型インゴットの重量は、それぞれ130.62gと113.11gで、合計243.73gであった。投入した空き缶の総重量（328g）に対する比率（回収率）を求めると74.3%が得られた。今回示した溶解手法では、回収率は溶湯処理（酸化物の除去操作等）時の手際により変動するが、毎操業、65～75%程度の値が得られた。資源のリサイクルや、材料と加工に関わる発展的な学習活動に十分適用可能だと思われる。なお、図8（b）に示すような菓子型を利用した様々なインゴットの製造に必要なアルミニウム空き缶の個数は、回収率を70%程度として、ビール缶（350ml）に換算すれば6～11個程度である。

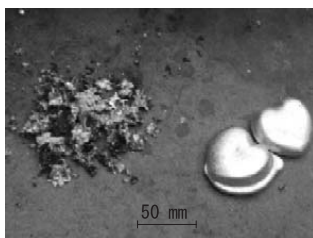


(a) たこ焼きプレートへの鑄込みの様子 (b) 菓子型を利用したインゴット例

図8 鑄込みとインゴット

表3 投入したアルミニウム空き缶⁹⁾

缶の種類		平均重量	数 量
135ml	ビール缶	10.95 g	1本
250ml	ジュース缶	15.16 g	2本
	その他	15.56 g	1本
300ml	ジュース缶	18.10 g	4本
350ml	ビール缶	15.89 g	7本
	ジュース缶	17.18 g	3本
500ml	ビール缶	19.23 g	2本
合 計		328 g	20本

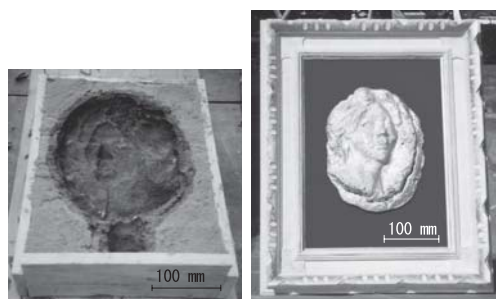
図9 酸化物とハート型インゴット⁹⁾

7 鋳型製作と美術作品制作への試み

アルミニウム空き缶の溶解および鋳造を通して、環境や資源・エネルギーを意識した学習展開の更なる可能性と発展について検討するために、簡単な鋳型（砂型）製作とそれへの鋳込みを試みた。

図10は、卒業制作¹⁰⁾の一環として取組まれたものであるが、石膏製の自刻像を元に製作した砂型へのアルミニウム溶湯の鋳込みにより制作したレリーフ作品と離型剤を塗布した砂型である。図11はその制作（鋳込み）風景である。鋳砂の取扱いに若干の経験を要すが、このような半立体のレリーフ作品の制作では鋳型製作も比較的容易である。このように、鋳型製作を伴う学習活動にすることで、ものづくりや作品制作への発展が可能となるとともに、学習者の高い興味関心の持続と学習内容の拡大と充実が図れる。

身近で手軽な鋳型材料としては、レンガや粘土が考えられる。さらに、少し高価ではあるが、鋳造用石膏も市販されている。粘土や石膏製の鋳型では、鋳込み時における鋳型材中の残留水分の沸騰による事故を防ぐためにその十分な乾燥が必須となる。なお、これらの材料を用いた平面に半立体の鋳込み型（模様）を彫り出せば、簡単なオリジナルペンダントの製作も十分可能であり、子どもたちの学習意欲の喚起とその持続が十分期待できる。



(a) 砂 型

(b) 作 品

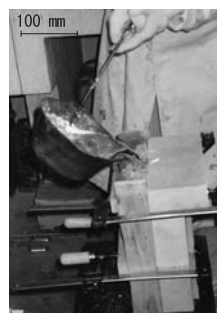
図10 砂型とレリーフ作品¹⁰⁾

図11 鋳込み風景

8 おわりに

学校教育現場での取組みを想定し、身近な飲料用アルミニウム空き缶の溶解および鋳造について、資源およびエネルギー学習題材としての立場からその意義と発展的展開の可能性について具体的に検討した。以下のようにまとめられる。

ものづくり学習題材としての製缶技術およびその技術史と生活との関わりとともに、材料の改善（改質）と加工技術の進歩に関する展開の可能性を示した。

身近な材料を用いた比較的安価な組立て式の溶解用ガス炉を提案し、それを用いた再生アルミニウムインゴット製造までの安全操業に関わる留意点を解説した。

アルミニウム空き缶から再生地金としてのインゴット製造までの実地学習に内在する資源およびエネルギー学習題材としての意義と有効性を示唆した。

鋳型の製作を含む鋳造加工への実践拡大により、学習意欲を高めたものづくり学習や作品制作への取組みの可能性を示した。

授業実践に際しては、指導時間や安全性の確保などの多くの解決すべき課題があると思われる。特に、安全面では、多人数を対象とし、しかも、高温器材の操作を含む取組みとなるため、徹底した注意喚起と教員の習熟した指導力が求められる。

本題材は多くの学習要素を含むため、学習目標の焦点化が重要となるが、子どもたちにとって極めて身近である飲料用空き缶を題材としているために、その製缶、溶解、再資源化、エネルギー消費等に関わる諸事項を体系的、かつ、実感を伴って学習させることができる。この学習が、「生活と科学技術」、さらには、「人類と文明」に関わる教科を超えた概念形成へと発展する糸口となることを期待したい。

参考文献

- 1) 経済産業省：「世界最高水準の省資源社会の実現へ向けて～グリーン化を基軸とする次世代ものづくりの促進～」報告書（2008）
- 2) アルミ缶リサイクル協会ホームページ：<http://www.alumi-can.or.jp/>
- 3) 社団法人 日本鉄鋼連盟ホームページ：<http://www.jisf.or.jp/index.html>
- 4) 金属，Vol.65 No.6（1995）PP.482-483
- 5) 大西健介：金属，Vol.65 No.5（1995）PP.379-392
- 6) 山本龍太郎：金属，Vol.65 No.6（1995）PP.485-494
- 7) 今津勝宏，佐藤信行：金属，Vol.65 No.5（1995）PP.393-404
- 8) 本田勇人：昭和62年度 卒業論文（長崎大学教育学部金属加工ゼミ）（1987）
- 9) 原田優子：平成16年度 卒業論文（長崎大学教育学部金属加工ゼミ）（2004）
- 10) 矢野暁子：平成5年度 卒業制作作品（長崎大学教育学部彫塑ゼミ）（1993）