



A. Hibino

## Mg 機械加工屑の再利用と圧縮成形

日比野 敦\*

### 1. はじめに

特徴ある性質から工業製品への Mg の利用が増えていることは周知の話ですが、ここ数年、需要の伸びと共に、‘Mg 機械加工屑の処理対策’の課題を耳にします。Mg 屑は活性で、放置すれば火災の恐れがあり、再溶解するにも屑の表面積が大きく、酸化・燃焼し易いためと考えられます。これまでに種々の Mg 屑の処理策が提案されました。しかし一長一短があり、鋼や Al のように確立された方法はありません。本学でも Mg 屑の処理についての検討を行いました。試した方法の実用性や商業性はありません。また、本号のお題は鍛接プロセスであり、話がずれて恐縮です。ですが、環境に配慮したものづくりが望まれる今日、Mg 加工の研究だけでは不足に思え、Mg 屑の処理策や廃 Mg の有効利用策の検討も必要に思います。さらに、Mg の高付加価値材としての需要が伸び、その生産現場での話を耳にすると、そうした研究の必要性を感じます。そんなことから、Mg 屑の有効活用について多方面から練るという観点で、しばらくの間ご辛抱を頂いて、お付き合いいただければと思います。

### 2. 金属屑の溶解と Mg リサイクル性

屑鉄や Al 屑は、炉を使って溶かして再利用することはご存知だと思います。特に Al はリサイクル性に優れると言われる。これにはどのような意味があるのでしょうか？ご専門の方々に釈迦に説法となり恐縮です。おそらく屑を溶かす理由は、回収金属と不純物、酸化物、異物を分離し、材料としての信頼性を確保するのが主目的と考えられます。いくら創意工夫して屑が固化できても、不純物、酸化物、異物が混ざりようでは、後になって何が起るかわからず、安心して使えません。金属に限らず、プラスチック、紙の再生でも、一旦溶かして、徹底して不純物、異物除去が行われるように、Mg 屑でもこれら除去が大切だと思います。金属片、鉄粉、さび、砂、工具片、砥粒などは、現場のどこにでもあるので、留意が必要に思います。

一方、Al がリサイクル性に優れるのは、融点が 660℃と低いこともあります。しかし、もう一つに Al の持つ性質で、金属と酸化物の比重差や濡れ性(界面エネルギー)、状態図(相図)から、相互分離し易いためと考えられます。故に Al 屑は、溶かせば、酸化物が除去出来て、リサ

イクルし易いと言われます。一方 Mg 屑はどうでしょうか？融点は 650℃と Al と大して変わりません。しかし Mg は活性で、揮発し易い金属です。また、溶解したときの金属と酸化物の比重差が僅かで、濡れ性も高いことから分離性は良くありません。酸化や蒸発せぬよう Mg 屑を溶かしても、酸化物と金属を分離しにくいのです。溶解で不純物や酸化物を分離出来ない場合は、Mg が蒸発し易いことを利用して、蒸留も検討されます。蒸留は高純度の再生地金が得られ、この方法は理想的です。しかし、蒸留プラントを新設するだけの処理量が見込めず、工程・原理も Mg の熱還元製錬と大きくは変わらないので、費用、エネルギー的に見ると、直ちに蒸留を利用できる状況では無さそうです。

では Mg 屑を Mg 製錬原料にするのはどうでしょうか？残念なことに、現在の技術では製錬原料に向きません。Mg 鉱石は Mg 濃度が安定したものが選ばれ、不純物も鉱石種でほぼ同一です。しかし、Mg 屑は含有量こそ高いものの、濃度や不純物がばらばらで製錬が厄介です。こうしたことから、屑の不純物、酸化物、異物について確実に調べが付き、何らかの加工によって再生できそうな高品位の Mg 屑を除いては、Mg 屑の再利用は発展途上にあると思います。特に、鉱石から新たな Mg を作るのは、莫大なエネルギーが必要であり、多量の CO<sub>2</sub>を排出するので、Mg 屑の有効活用は将来にとって重要と思います。

### 3. Mg 機械加工屑の圧縮成形と Al 合金添加剤への応用

Mg 屑が厄介なのは、先にも述べた通りです。不純物や酸化物、異物について心配のない、高品位な Mg 屑の固化再生技術は、種々方法が提案され、研究が進んできました。しかし雑多な Mg 屑は多く、また再利用策、処理策を多方面から検討することは、将来にとって必要に感じます。そこで、Mg 機械加工屑を圧縮成形して屑の表面積を減らし、ご存知のように Mg の大手需要家が Al 合金製造のことから、Al 添加材としての利用を検討しました。実際のところ、Al 合金製造では溶解が主要工程であり、不純物除去や精製について大きな効果は期待できません。ですが、それでも Mg 屑の不純物、酸化物、異物を減らすうえでは効果を発揮し、多少なりとも役立つだろうと考えました。実験にあたって AZ 系 Mg 屑は企業様からお分けいただきました。代表的な Mg インゴットを鋸盤で切断した際の切断屑、Mg を NC 旋盤で切削し

\*富山県立大学工学部 機械システム工学科 准教授

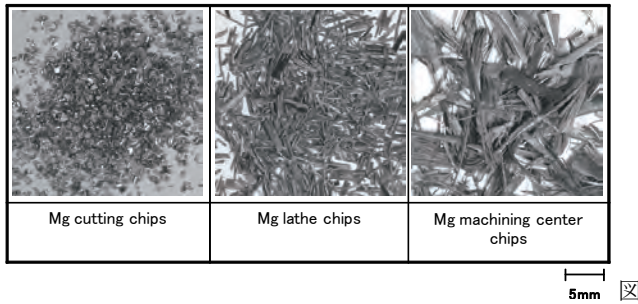


図 1 : Mg 機械加工屑の外観.

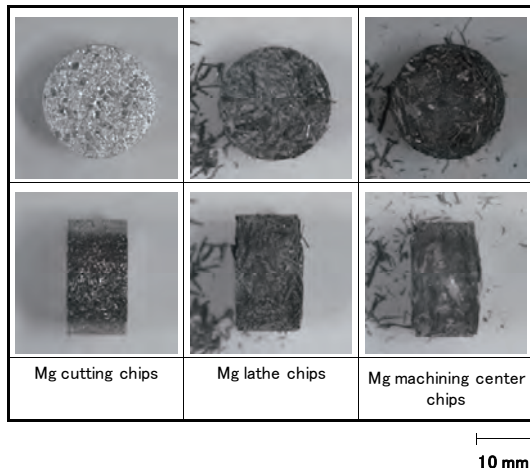


図 2 : Mg 機械加工屑の圧縮成形結果.

実際の旋盤屑, Mg をマシニングセンターで切削した際のマシニングセンター屑について実験を行いました. 図 1 に, これら屑の外観を示します. また図 2 には, 圧縮成形結果を示します. (1)の切断屑は, 成形性が良好でしたが, Mg 旋盤屑, Mg マシニングセンター屑は, 手に持つと崩れるほど成形性に劣り, そのままでは成形できないことが分かりました.

このように Mg 屑の圧縮成形性が劣る理由は, 圧縮成形時の屑の再配列性(流動性)が無く, また塑性変形能に乏しいのが原因と考えられます. Mg 屑は加工硬化し, 塑性変形能に劣ります. また, 形状も不規則で再配列性(流動性)にも劣ります. 丁度, 満員電車に人が乗り込むときに, 互いに人が位置を調整し, かつ体の姿勢を変えることから想像できます. そこで圧縮性の悪い, Mg 旋盤屑や, Mg マシニングセンター屑について, 成形性改善の目的で Mg 屑にバインダーやアスファルトを配合する. Mg 屑に塩類 (Al フラックス) を混合する. 屑を焼鈍する, Mg 屑に Al 屑など他種屑を混合するなどして, Mg 屑を圧縮成形し, またその成形性について, Cooper 式による解析を試みました.

#### 4. Mg 機械加工屑の圧縮成形と Cooper 式による圧縮解析.

精密な圧縮成形モデルも提案されていますが, 高度なことから, モデルの扱いが大変です. そこで, 物理的根拠は曖昧ですが, 平易な Cooper モデルの利用を考えました<sup>1)</sup>.

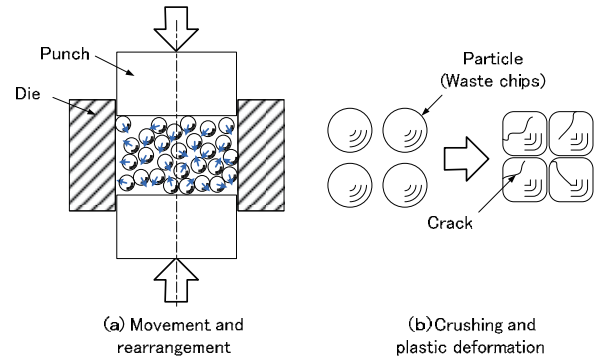


図 3 : 圧縮成形の模式図.

屑や粉末の圧縮成形を大雑把に考えれば, 図 3 のように, 以下の 2 つの過程が考えられます.

- 第 1 段階: 屑や粒子の再配列: 屑や粒子の隙間に, 別の屑や粒子が入り込むなど, 屑や粒子の移動による粉末の収縮で, 粒子間の摩擦や, 金型と粒子の摩擦が影響する. 主に圧縮初期の, 低い圧力範囲で生じる.
- 第 2 段階: 屑や粒子の破碎と塑性変形: 屑や粒子自身が塑性変形したり, 破碎することによる収縮で, 屑や粒子の変形抵抗, 破壊強度が影響する. 主に, 高い圧力範囲で生じる.

それぞれの過程を指数関数で近似し, 式で表わせば

第 1 段階: 屑や粒子の再配列について

$$C = a_1 \cdot \exp(-k_1/P) \quad (1)$$

第 2 段階: 屑や粒子の破碎と塑性変形について

$$C = a_2 \cdot \exp(-k_2/P) \quad (2)$$

ここで,  $P/\text{Pa}$ : 圧縮圧力,

$C/-$ : 体積圧縮率.

なお, 体積圧縮率  $C$  は, 圧力  $P$  のときの成形体の見かけの体積を  $U$ ,  $P = 0$  のときの見かけの体積を  $U_0$ , 成形体を完全に密に圧縮した場合の体積を  $U_t$  とすると, 次式で計算される.

$$C = (U_0 - U)/(U_0 - U_t) \quad (3)$$

また,  $a_1, k_1, a_2, k_2$  はパラメータであり, 次のような意味を持っている.

$a_1$ :  $P = \infty$  のときの屑や粒子の再配列による体積圧縮率.

$a_2$ :  $P = \infty$  のときの屑や粒子の破碎と塑性変形による体積の圧縮率.

$k_1, k_2$ : 圧力の次元をもつパラメータで, この値が小さいほど低い圧力範囲から体積の収縮が起こることを示す.

実際の屑や粉末の圧縮成形では, 再配列の収縮と, 破碎・塑性変形による収縮が同時に起こるので, 全体の体積の収縮は,

$$C = a_1 \cdot \exp(-k_1/P) + a_2 \cdot \exp(-k_2/P) \quad (4)$$

ただし, 圧縮初期の圧力の低い範囲では, 屑や粒子の再配列だけが起こり, 屑や粒子の破碎や塑性変形は生じ

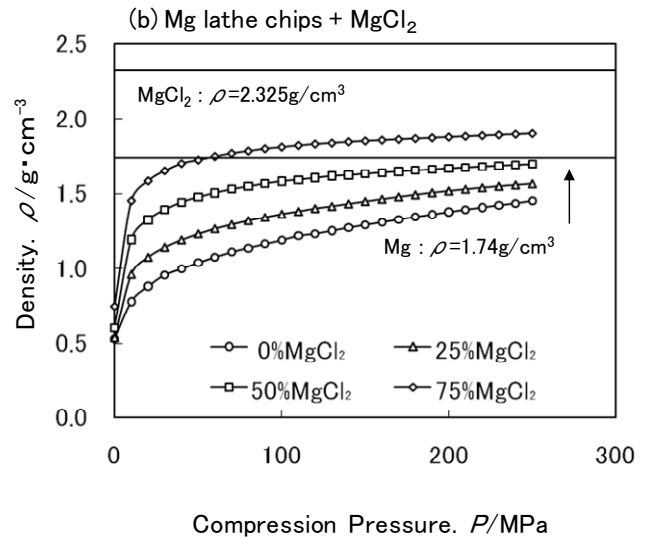
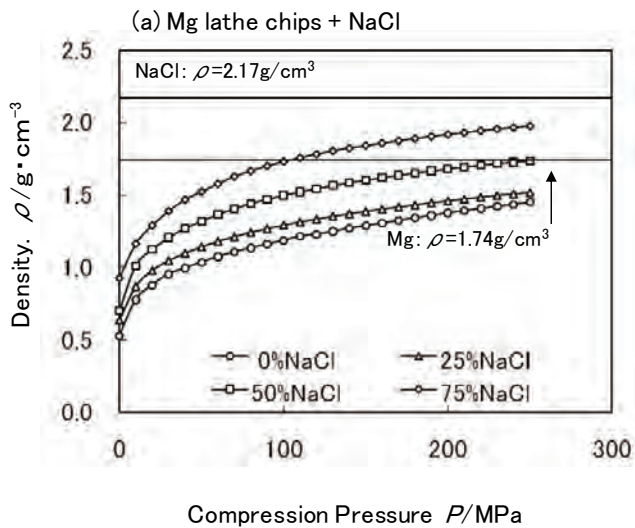


図 4 : Mg 機械加工屑の圧縮曲線, (a) Mg 旋盤屑+NaCl, (b) Mg 旋盤屑+MgCl<sub>2</sub>.

ないので、近似的に上記の式(1)が成り立つ。一方、圧力が増し、再配列が進行して屑や粒子が移動できる余地が少なく、直接屑や粒子に力が加わるようになると、屑や粒子の破碎や塑性変形も生じる。従って、圧縮初期の低圧力範囲のデータから、式(1)により  $a_1$ ,  $k_1$  が決定される。一方、粒子の破碎や塑性変形に関するパラメータは、先に求めた  $a_1$ ,  $k_1$  を利用し、式(4)を用いれば  $a_2$ ,  $k_2$  が決定できる。

そこで本実験では、圧縮性の悪い Mg 旋盤屑、Mg マシニングセンター屑の圧縮成形を行い、Cooper 式による解析を試みました。

図 4 に、例として Mg 旋盤屑に、Al 溶解フラックスである NaCl や MgCl<sub>2</sub> を混ぜ、圧縮したときの圧縮曲線を示します。混合によって、屑の圧縮曲線が大きく変わり、成形性が変化したことがわかります。

図 5 に、その Cooper 式の解析結果を、図 6 には、Mg 旋盤屑に NaCl を混ぜて作製した成形体の強度を示します。これらの結果のように、 $a_1$ ,  $k_1$ ,  $a_2$ ,  $k_2$  が変化し、強度も向上して、成形性が向上したことがわかります。なお成形体の強度は、成形体が作製でき、崩れずハンド

リングできれば十分と思います。

図 7 に、Mg 旋盤屑に Mg 切断屑や Al 旋盤屑を混ぜたときの成形体の組織例を示します。Mg 屑のみでは、屑が層状に配列し、噛み込みが少ないですが、Al 屑を混ぜることによって屑の間に他の屑が入り込み、噛み込みが増えることがわかります。図 5 の Cooper 式の解析でも、 $a_1$  が増加し、 $k_1$  が減少していることから、屑の再配列性が改善され、Mg 屑の成形性が向上することが分かりました。

## 5. 溶融 Al への Mg 屑成形体の投入実験

このように、Mg 屑にバインダーやアスファルトを配合する。Mg 屑に塩類 (Al フラックス) を混合する。Mg 屑を焼鈍する、Mg 屑に Al 屑など他種屑を混合するなどすることで、成形性が大きく改善でき、Mg 屑成形体が得られるので、Al 合金添加剤としての効力を調べるために、Al を溶解し、その中に得られた成形体を投入しました。

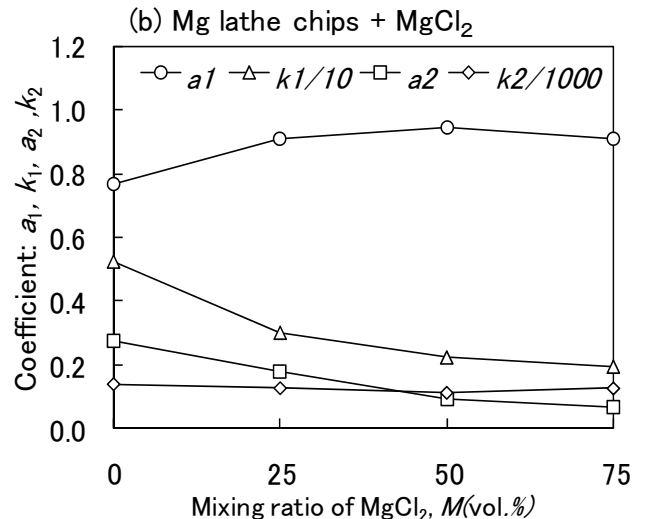
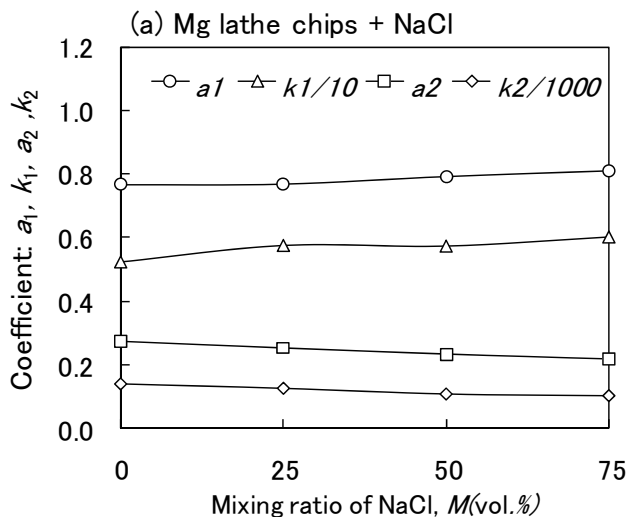


図 5 : Cooper 式による解析結果, (a) Mg 旋盤屑+NaCl, (b) Mg 旋盤屑+MgCl<sub>2</sub>.

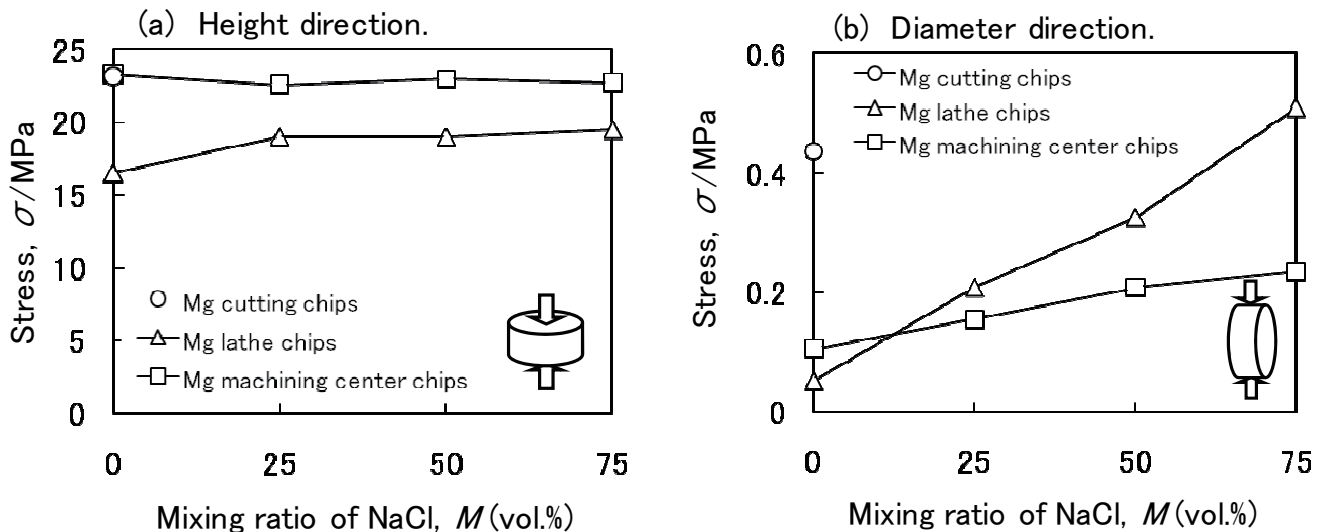


図 6: Mg 旋盤屑+NaCl 混合体から得た成形体の強度. (a)高さ方向の圧壊強度, (b)直径方向の圧壊強度.

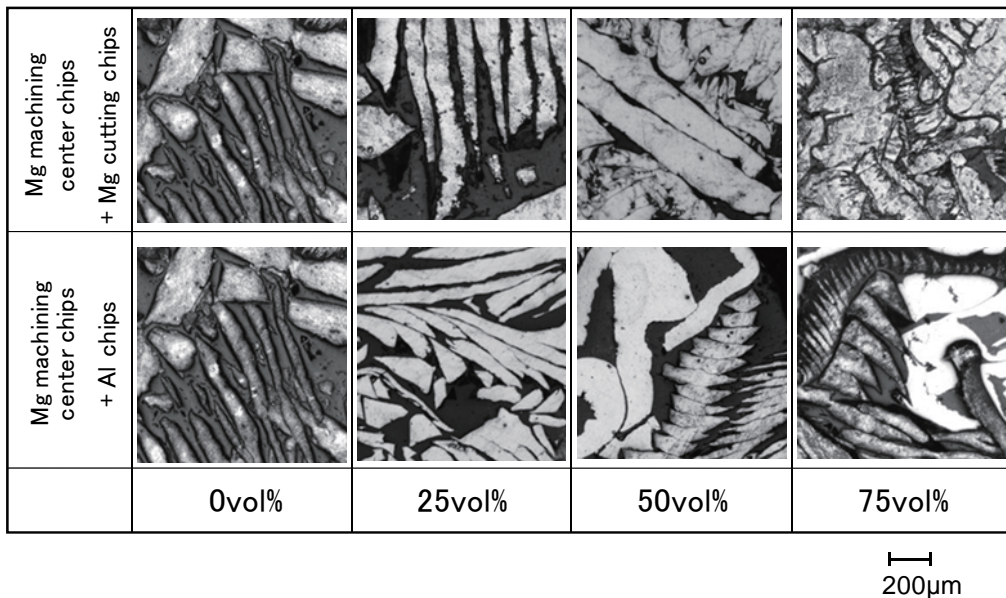


図 7: Mg 機械加工屑成形体の微視組織.

図 8 に, その結果を示します. 図の横軸が正味の Mg 投入量 (投入組成), 縦軸が得られた Al-Mg 合金中の Mg 濃度です. 図の 45° の線が収率 100%に相当します. なお, Mg 屑をそのまま, あるいは Mg 屑成形体のみを炉で溶かそうとすると, 炉の熱で直ぐに燃えてしまいます. しかし, 熔融 Al に Mg 屑の成形体を溶かすことで, およそ 70~80% の Mg 収率が得られ, 大学の実験室レベルでは, 原理的に Mg 屑の成形体は, Al 合金添加剤としての役割をすることが分かりました.

図 9 に, 得られた Al-Mg 合金の硬さ, 図 10 に圧縮強度を示します. 硬さ, 圧縮強度を, 組成の近い A5052 合金と比較すると, 市販の A5052 合金では, 調質が施されているので硬度は高く, 圧縮強度も高強度です. さらに, 市販の A5052 合金では, 微視組織制御の目的で Cr も入っているため, その影響も考えられます. しかし, 市販の A5052 合金に焼鈍を行って調質の影響を取り除けば, Mg 屑から作った Al-Mg 合金と, 市販の A5052 合金はほぼ同じ硬さ, 強度となります. このように, Mg 機械加

工屑から作った Al-Mg 合金は, 市販と大差なく, Mg 屑成形体は合金添加剤としての役割を果たすことが分かりました.

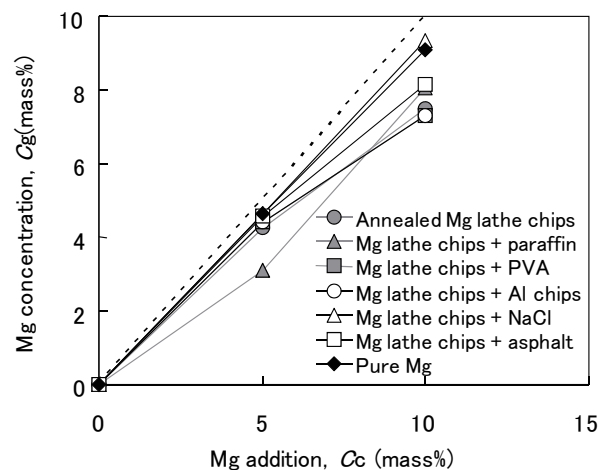


図 8: 熔融 Al への Mg 屑成形体の溶解実験.

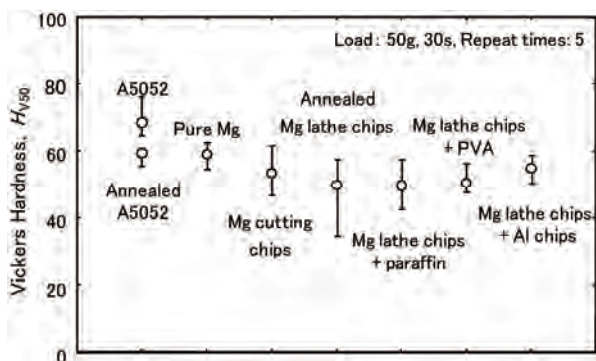


図 9: Mg 屑成形体から得た Al-2.5mass%Mg 合金のビッカース硬度.

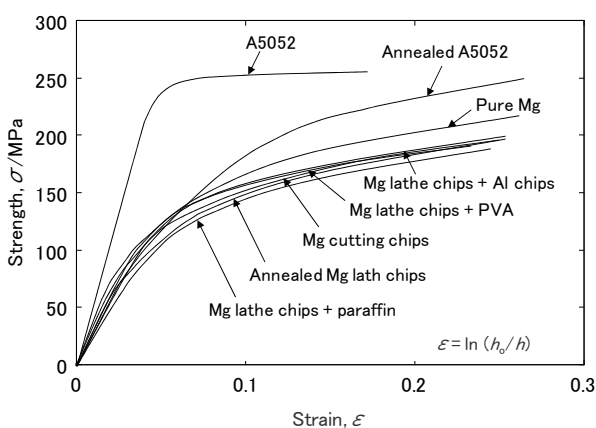


図 10: Mg 屑成形体から得た Al-2.5mass%Mg 合金の圧縮試験.

## 6. Mg 機械加工屑再利用のうえでの問題点.

しかし、Al 企業の方にお話を伺ってみると、本方法にはいくつか問題があることが分かりました。その方のお話では、Mg に含まれる合金成分が一番問題とのこと。ご承知のように工業製品に使われる Mg の多くは AZ 系 Mg 合金です。品種にもよりますが、およそ数%の Zn が含まれています。しかし、この Zn が Al に入ると、7000 系 Al のスクラップ処理でも問題となるように、除去が厄介で、Al の耐蝕性を劣化させたり、陽極酸化処理工程でトラブルが出て、製品性状が劣化します。分散強化型 Al 合金の耐食性が芳しくないのと、同様な問題に思えます。また、Mg 屑には切削加工時の冷却水が含まれ、この水も問題です。水が持ち込まれると Al は酸化し、極端には突沸の恐れもあります。また Mg 屑の成形体には隙間があるので、空気も含んでいます。空気も水と同様で、こうしたものを溶融 Al に入れるのは、リスクが大きすぎるのお話でした。

Mg 屑に限らず、金属屑の再利用、再生のうえでは元の金属に戻るのが理想といえます。しかし、そもそも屑であるので元の金属に戻すのは不純物、異物の除去に多

くの手間と費用を必要とし、技術的観点からも完全には達し得ない話と思います。高級鋼がふんだんに使われる自動車スクラップでさえも配線材が混入し、Cu は鋼の熱間脆性の原因となり、鋼の再生材の用途は限定されます。自動車スクラップの大半が、建設用棒鋼に廻されるのは、このような事情とと思います。またアルミ缶の再生でも、ブルトップが混入して、不純物元素濃度が下がるよう、Pure な Al で薄めるのはこうした話からと思います。

一方、Mg 屑から新たな副製品を作るのは、一種の廃物利用であり、利益も期待でき、夢が生まれます。しかし小規模ならばともかく、不純物、酸化物、異物について確実な調べがつかない限り、商業生産ではどこまで利用できるかが未知数です。商品とするからには、それなりの信頼性や、製造安定性が求められ、さらには本来の主力製品と、屑から作られる副製品との需要バランスも重要と考えられます。下手をしたら、原料が Mg 屑であった故に商品に瑕疵が生じる、あるいは Mg 屑から作った副製品ばかり売れ、本来の製品がさっぱりというリスクも忘れてはならないと思います。

だからといって、屑を本実験のように需要の大きなところへ転用し、吸収させることを考えた場合は、屑が貴金属や稀少金属で無い限りは、大して収益がなく、リスクばかり生じるのは上記の通りです。“Mg 屑に保証が無い以上、無理をして屑を使うよりも、新たな Mg を買って使った方が安心確実。”という判断は正しいと思います。製造安定性や製造物責任から、高品質材が求められる今日ではなおさらでしょう。このあたりに Mg 屑の再利用の難しさがあり、Mg の発展や普及のためには、Mg 屑や廃 Mg の処理プロセスを根本的に考える必要があります。

最近では Mg 製品の普及や、金属市場の動向から、廃 Mg 処理プラントの進展が見られ、特殊雰囲気ガスが必要なものの、以前のように Mg 屑の回収や再溶解が滞ることは少なくなりました。また Mg を加工し、製品を作る立場としては、Mg 屑処理の話は本業とかけ離れ、1 社で対処できる話で無い事も事実です。しかし、社会全体として環境課題が重要となっている今日、Mg が作られて、加工され、使用され、再生され、寿命終えるまでの Mg の一生を考えた物創りが望まれていると思います。

こうした課題については様々なアプローチがある様に考えられ、皆様方の色々なアイデアをぜひ持ち寄られたいと思います。どうぞご教示、ご指導を賜りますようお願い申し上げます。

## 文 献

- 1) A. R. Cooper, L. E. Eaton: “Compaction Behavior of Several Ceramic Powders”, J. Amer. Ceram. Soc. **45**(1962)97-101.