

工業用砥石廃材の再生による有用化 (2)

山口 幸男

名古屋工業大学セラミックス基盤工学研究センター
〒507-0071 岐阜県多治見市旭ヶ丘 10-6-29

Utilization by Recycling of Waste Grinding Wheels II

Yukio Yamaguchi

Ceramics Research Laboratory, Nagoya Institute of Technology
Asahigaoka 10-6-29, Tajimi Gifu 507-0071 JAPAN

From viewpoint of resources and environmental protection, in order to recover abrasive grains from waste resinoid grinding wheels are recovered, sorted, crushed, combused / thermal decomposed, separated, and so on. In this way recovered abrasive grains are reused as grinding wheel materials. In this report a study with regard to recycling of waste resinoid grinding wheels is introduced.

1. はじめに

わが国の主要産業である鉄鋼・金属産業をはじめ、自動車産業やその部品関連産業等の多くの産業においては、年間約4万トンの工業用砥石が使用¹⁾されているが、そのうちの1/4～1/3は砥石を機械に取り付ける構造上の問題から使用できず、産業廃棄物として管理型処分場にて埋め立て処分されている。このことが他の廃棄物と同様に処分場の不足問題や資源の無駄遣いを招いている。そこで、前報²⁾でも紹介したように、使用済みとなったピトリファイド砥石を回収・再生し、パレル研磨材や各種グリットに再利用³⁾することにより、資源の有効活用と処分量減少による環境負荷低減を達成することができた。本報では、懸案となっているレジノイド砥石廃材の有用化についての取り組みを紹介する。

ド砥石のリサイクルを困難にしている原因の一つである。代表的なレジノイド砥石の外観を Fig.1 に示す。



Fig.1 レジノイド砥石の外観

2. レジノイド砥石とは

レジノイド砥石は、研削・研磨性を有する酸化アルミニウムや炭化珪素のような硬質セラミックス、すなわち砥材をフェノール樹脂等の高分子化合物で結合・固化した砥粒加工用の工具で、その結合剤の特性を活かして、鉄鋼・金属、医療、磨き等の分野に多用されている。その構成成分は Table1 に示す如くであり、ピトリファイド砥石に比べて多くの成分から成る場合が多いが、それは研削性能の向上や高速使用のための強度アップのためである。この多成分であることが、レジノイ

Table1 レジノイド砥石の主な構成成分 (ピトリファイド砥石との比較)

		レジノイド砥石	ピトリファイド砥石
砥材		酸化アルミニウム質 (Al ₂ O ₃) 炭化珪素質 (SiC) 両者のコンビ (Al ₂ O ₃ /SiC)	酸化アルミニウム質 (Al ₂ O ₃) 炭化珪素質 (SiC)
結合剤		高分子化合物 (フェノール樹脂、エポキシ樹脂等)	ガラス質バインダー
添加剤	気孔材	無機質中空体 水溶性顆粒状物	有機質顆粒状物 (製造工程中に消失)
	補強材	ガラスクロス、等	なし
	研削助剤	硫化鉄、塩化カリウム、等	(一部硫黄含浸あり)

また、その製造工程とその役割を Table2 に示す。

Table2 レジノイド砥石の製造工程とその役割

工程	役 割
秤量	砥石原料（砥材・結合剤・添加剤等）の量り取り
混合	上記原料の決められた順序での攪拌・混合
成形	<大きく分けて3種類の成形方法> ・常温プレス：金型装填物の常温加圧成形 ・ホットプレス：金型装填物の加熱加圧成形 ・鑄込み：攪拌混合物の鑄型装填・常温硬化
熟成	200℃以下での樹脂硬化反応及びアフタキュア
仕上	内外周・面の寸法・形状に仕上げ
検査	硬度・バランス・回転試験等の品質チェック

Table3 結合剤の除去方法

方法	メリット	デメリット	総合評価	
①熱分解法	処理能力高い 残存物少ない	排ガス浄化装置のインシヤル/ランニングコストが高い	3	簡便且つ確実性が高い (多種のガス処理が必要)
②溶剤法	砥粒ダメージ小さい 消費エネルギー少ない	処理能力低い 廃液処理コスト高む	2	砥材ダメージ小なるも廃液処理コスト、フィルター分離困難
③アルカリ剤分離法	同上	同上	2	同上
④酸化剤分離法	同上	フィルターによっては有害ガス発生 の危険性有り	1	作業環境に問題有り
⑤熱水蒸気法	砥粒ダメージ小さい	処理能力低い	2	実用性に乏しい
⑥超(亜)臨界法	閉鎖系のため作業環境 良い	処理能力低く、装置インシヤル/ランニングコスト高い	1	多品種・多成分系の砥石への適用困難

評価点：良 (3) ←————→ (1) 悪

3. レジノイド砥石の再生について

前報でも述べたように、再生に取り組むに際して最も重要なことは、再生した後の製品の用途が明確であること、適正な方法と適正なコストで再生可能であることが挙げられ、このことが法遵守の下で持続的な事業運用に繋がるものとする。このような考え方を前提にしたレジノイド砥石再生の取り組みについて述べる。

3-1. 再生製品の用途

レジノイド砥石廃材の再生に際しては以下の事柄を明確にして取り組んだ。

- ・再生の対象：砥材（選定理由：使用量が一番多い、高価である、他の原料より再生利用し易い。）
- ・再生砥材の用途：砥材の最大の特徴である研削性及び研磨性が活かせる分野であること。
 - <優先順位> 砥石原料>研磨布紙原料>ラップ材>バレル研磨材>投射材
- ・再生砥材の品質基準：上記用途でのバージン砥材の品質規格に適合すること。

3-2. 再生方法の選定

前報で紹介したビトリファイド砥石の再生フローを参考にして、レジノイド砥石廃材の基本的な再生フローを以下とした。[回収] → [選別] → [破碎] → [熱分解] → [分離] → [再生砥材]

この再生フロー中の砥石結合剤である樹脂の除去に熱分解手法を選定した理由は、以下の Table3 に示す種々の手法から総合的な評価から、簡便且つ最も確実性のあるこの手法を採用することとした。

3-3. 再生における要素技術

前項で記述したレジノイド砥石の基本的な再生フローには、Table4 に示す5つの重要な要素技術が存在し、こ

Table4 砥石廃材再生の要素技術

No.	要素技術	内 容
1	破碎技術	砥石廃材の微細化、複層構造から有用部分の分離
2	熱分解技術	結合剤である樹脂の熱分解による除去
3	排ガス浄化処理技術	熱分解の際に発生する有害ガスの浄化処理
4	分離技術	多成分原料からの砥材の分離
5	再生砥材の評価及び使用技術	再生砥材としての / 再生砥材を用いた砥石としての評価 研削・研磨用を主体とした再生砥材の使いこなし

の要素技術の確立こそが持続可能な再生事業の根幹を成すものとする。

3-3-1. 破碎技術

破碎と言えば通常は、クラッシャーによる廃材の微細

化を指すが、Fig.2 に示すように、ここでは砥石特有の特にレジノイド砥石に多用されている複層構造からの有用部分の分離も含めた広義の破碎を指すものとする。微細化目的であればジョークラッシャーやハンマクラッシャー等の一般的な破碎設備がレジノイド砥石に最適である。しかしながら複層構造の分離には、ダイヤモンドバイトによる削り出しが常識的であるが、バイトの損耗や能率を考えると、熱的な支援による分離方法が好適であることを見出した。

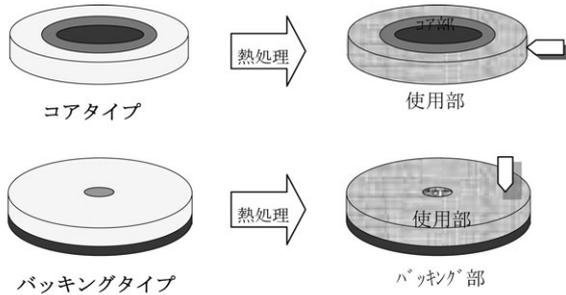


Fig.2 レジノイド砥石の複層構造とその分離

3-3-2. 熱分解技術

幾つかの結合剤除去方法の中から、3-2のTable2に述べた理由より、熱分解法を採用することとしたが、目指すところは、①砥材に与えるダメージが少ない、②有害な排ガスの発生が少ない、③より低温で樹脂の分解・除去が可能である、といったことである。具体的には、環境浄化セラミックスと称する触媒を併用して、前述の3つの課題をクリアすることにより、環境負荷が少なく且つ安価な再生方法を見出すことにある。要点をまとめるとTable5になるが、今後は表中の熱分解条件の各項目の最適化を実験により確かめていく。

3-3-3. 排ガス浄化処理技術

レジノイド砥石廃材の熱分解に際して発生するガス⁴⁾は、大きく分けて2種類ある。砥石の結合剤であるフェノール樹脂やエポキシ樹脂の熱分解物である有機系ガスと砥石添加剤である無機化合物の反応・分解物である無機系ガスである。Fig.3とTable6にガス発生源となるフェノール樹脂と無機質添加剤を示し、Table7に簡易熱分解実験より検出した有機系ガスと無機系ガスを示す。参考までに、ガスクロマトグラフ質量分析装置にて分析したスペクトルをFig.4に示す。

Table5 熱分解技術の要点

狙い	熱分解方式と条件	期待効果
①砥材への低ダメージ化	・酸化触媒(浄化セラミックス)の併用 ・温度、雰囲気、空気流量、時間等の最適化	・環境負荷の低減化 ・再生の低コスト化 →持続可能な再生事業へ
②有害排ガス発生の抑止		
③低温熱分解の促進		

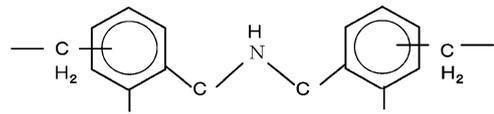


Fig.3 有機系ガスの発生源 (フェノール樹脂)

Table6 無機系ガスの発生源 (無機質添加剤)

硫化鉄 (FeS ₂)	塩化カリウム (KCl)
硫酸カリウム (K ₂ SO ₄)	酸化カルシウム (CaO)
硫酸バリウム (BaSO ₄)	炭酸カルシウム (CaCO ₃)

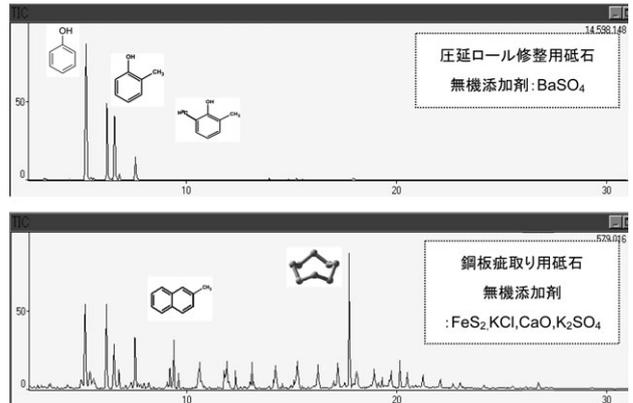


Fig.4 レジノイド砥石廃材の熱分解ガスのGC-MS分析スペクトル

Table7 発生ガス成分 (有機系ガス及び無機系ガス)

有機系ガス		無機系ガス
分析装置: ガスクロマトグラフ質量分析装置 島津製作所 "GC-17A"		分析機器: ガス検知管 ガステック社製
フェノール	アンモニア	硫黄酸化物 (SO _x)
クレゾール	脂肪族第一アミン	窒素酸化物 (NO _x)
キシレノール	脂肪族第二アミン	炭素酸化物 (CO _x)
ベンゼン	脂肪族第三アミン	塩素 (Cl ₂)
トルエン	脂肪族不飽和アミン	塩化水素 (HCl)
キシレン	脂環式アミン	硫化水素 (H ₂ S)
芳香族炭化水素	芳香族アミン	硫化カルボニル (COS)
脂肪族炭化水素	...	二硫化炭素 (CS ₂)
アルデヒド類		...

注) 熱分解条件 試料: ①圧延ロール修整用砥石、②鋼板疵取り用砥石の1cm³片
所定温度 (400℃, 500℃, 600℃) にセットした電気炉内に上記試料の入った坩堝を投入し、発生するガスを採取・分析する。

鋼板疵取り用の砥石では硫化鉄 (FeS₂) からの硫黄も検出されている。
以上のように、レジノイド砥石廃材の熱分解に伴うガス

は複雑・多岐に亘り、しかも熱分解条件によってもガス成分は異なる⁵⁾ ことが見出されている。一種類の浄化方法だけでは対応不可能と推定される。現在模索中であるものの、①有機系ガスは浄化セラミックス⁶⁾⁷⁾ を用いた酸化触媒燃焼で、②SO_x は酸化触媒脱硫の応用で、③NO_x は自動車排ガス処理技術の応用で、④ダイオキシン類は煤塵とともに活性炭或いはCa系の無機化合物とバグフィルターで無害化・捕集⁸⁾ する等を参考に、処理能力に合わせたイニシャル及びランニングコストの少ないコンパクトな装置に仕上げることを目指している。

また、このような装置を用いて浄化した排ガス及び煤塵の濃度は、その処理施設のある区域の条例で定められた規制値以下でなければならない。参考までに、排ガス及び煤塵濃度に関する基準値例をTable8に示す。当然のことながら、この数値は一つの目安であり、処理施設周辺の環境を考えれば、限りなく0に近い数値であることが望ましく、それを達成できる浄化方法や装置を目指すべきである。

Table8 排ガス及び煤塵の基準値例

排ガス成分、他	排ガス及び煤塵基準
・硫黄酸化物 (SO _x)	10ppm 以下
・窒素酸化物 (NO _x)	50ppm 以下
・塩化水素 (HCl)	10ppm 以下
・一酸化炭素 (CO)	30ppm 以下
・ダイオキシン類 (DXN _q)	0.01ng-TEQ/m ³ N 以下
・煤塵	0.01g/m ³ N 以下

3-3-4. 分離技術

熱分解処理を行ったレジノイド砥石廃材には、主な回収対象である砥材の他に、研削・研磨性能向上のための無機質添加剤、再生工程中に混入した不純物、研削中に混入した切り粉が原因の鉄粉や酸化鉄粉等が含まれるので、それらの分離も重要な技術の一つである。分離には材料の特性を利用した幾つかの方法があるが、材料をレジノイド砥石廃材とした場合には概略以下のTable9のように分類される。

実用性を考えた場合には、乾式での振動篩分けが最も低コストで能率良く行なえるが、より精密な分離を求められる場合は、湿式分級や重液分離の採用も必要とされる。但し、コスト面での問題が生じることから、能率を追求した装置の工夫が必要と思われる。尚、研削中に混入した鉄粉は磁力選別機で取り除く。

3-3-5. 再生砥材の評価及び使用技術

再生砥材を使用するに際しては、砥材として及び砥石としての評価を行なうものとする。前者は色調・粒度分

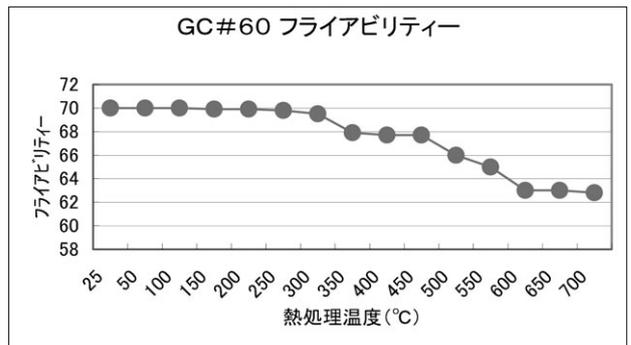


Fig.5 熱処理温度の砥材靱性に与える影響

Table9 レジノイド砥石廃材熱分解物の分離方法

乾式分級		湿式分級	
篩分け	150μm 以上の粗粒子	沈降分級	カット特性不良
重力分級	200μm 以上の粗粒子 (易凝集粒子は適さず)	水力分級	カット特性良
遠心分級	5 ~ 150μm の細粒子	機械分級	細粒 (分級点 75 ~ 150μm)
慣性分級	遠心力と重力の併用	遠心分級	100μm 以下

注) 上記の他に、重液分離、磁気分離、静電分離、過電流分離、ジグ選別等がある。

布・高比重・硬度・靱性・化学組成等の砥材としての基本特性の評価であり、後者は砥石にした場合の研削及び研磨性能の評価である。また、使用技術とは再生砥材の使いこなしであり、①供給量と品質バランスを考慮した新品砥材への添加比率の最適化、②再生工程での特性変化(例えば、炭化珪素砥材の靱性向上や砥材表面酸化皮膜の形成)を利用した新しい用途開発等が挙げられる。参考までに、炭化珪素#60砥材の熱処理温度の靱性に及ぼす影響をFig.5に

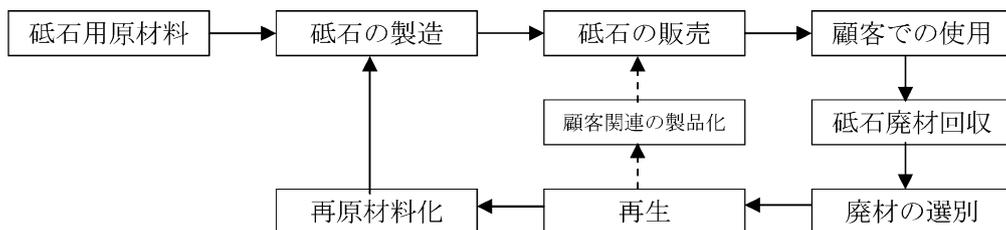


Fig.6 目指すべき資源循環型の砥石生産システム

示す。

4. 今後の課題

現時点では、レジノイド砥石の再生・有用化までに至っていないが、継続して基礎となる要素技術の確立を行うとともに、産業廃棄物処理法をはじめとする関連諸法の対応、事業展開に必要な採算性の検討等を行ない、ビトリファイド砥石廃材の再生・有用化と合わせて、最終的にはFig.6に示す“目指すべき資源循環型の砥石生産システム”の構築を図っていく。

参考文献

- 1) 経済産業省ホームページ (2006年度版)
<http://www.meti.go.jp/statistics/>
- 2) 名古屋工業大学 セラミックス基盤工学研究センター年報
Vol. VII 2007 pp.45-48
- 3) 株式会社ノリタケカンパニーリミテド：社会・環境報告書
2006年度版 pp.4-5
- 4) 佐々木健作, 小島義弘, 松田仁樹, 寺田好晴, 加納勝博：
工業砥石廃材の酸化処理および水蒸気処理による砥材の回収,
廃棄物学会論文誌別冊, Vol.15, No.1 pp.19-27, 2004
- 5) 武松知行, 秋山 清, 鈴木茂明, 池村 糺：フェノール樹脂の
水素化熱分解における反応諸条件の影響：石油学会誌, 第
19巻, 第5号, pp.399-408 (1975)
- 6) 松村ほか：第19回廃棄物学会研究発表会講演論文集,
pp.561-563(2008)
- 7) H.hosono and Y.Abe, *Inorg. Chem.*, 1987, 26, 1192-1195
- 8) D.Hiabayashi, T.Yoshikawa, K.Mochizuki, K.Suzuki, *Adv.
Sci. Tech.*, 2006, 45, 2169-2175