



ミニ特集・3

低環境負荷社会へのプロセス革新

回生材料のモルフォロジーフリー微細粒化加工プロセス

Morphology-Free Processing for Recyclable Materials with Microstructure Refining

相澤龍彦 東京大学 先端科学技術研究センター 教授
Tatsuhiko Aizawa

1 はじめに

リサイクルプロセスを、製品製造プロセスに対する「静脈」として見るだけでなく、消費されるサービスと物質消費を分離し、トータルの物質材料消費量を減少させ、使用する物質材料効率を高める方向が指向されている¹⁾。ここでは、技術外因子(例えば、グリーン調達などの法的規制整備)も含めたインパクトにより、廃棄物としての負の価値からクオリティを増加させ、市場要請条件とのバランスを想定できるゾーンにまで、クオリティと価値を高めるリサイクリングが必要となる^{2,3)}。環境対応プロセス(Environmentally Benign Manufacturing and Materials Processing: EBM)⁴⁾では、クオリティ増加(ΔQ)をはかる技術を開発し、回生材料などからの価値増加($\Delta V/\Delta Q$)、適切コストからの効率的なクオリティ増加($\Delta Q/\Delta C$)をはかる技術インパクトが不可欠となる。

バリアフリープロセス(Barrier-Free Processing: BFP)は、この環境対応プロセス創出に向けて、新しい技術インパクトを研究開発し、より広いマテリアル・セレクションを可能とするとともに、長期間の製品利用を実現することを目指している。ここでは、その1つの技術インパクトとして、回生材料のモルフォロジーフリープロセスについて解説する。

材料プロセス・製品製造中に排出される、いわゆるグリーンリサイクル材でも、その形態はさまざまであるが、回生原料では物理化学的な分別・分離過程後のマテリアルを扱うため、母材の形状、調整成分材の形態もきわめて不揃いであることに加え、不純物も混入してくるため、そのままでは廃棄コスト分の負の価値しか持ち得ない。言い換えれば、この状態からクオリティ増加をはかるには、形状・形態が大きく異なる回生原料を入力材料として受け入れ、新たに研究開発する技術的インパクトにより、市場で使用できる製品素材にまでクオリティを増加させることを、リサイクリング・プ

ロセスとして設計しなければならない。この技術インパクトが固相リサイクル⁵⁻⁷⁾である。

2 固相リサイクルプロセスの技術インパクト

固相リサイクルの特徴は、図1に示すように、リサイクル材の集荷、物理的分別・破碎、化学的分離後の回生原料をそのまま入力材とし、インプロセスにおける組織制御により、 ΔQ の増大、ひいては $\Delta V/\Delta Q$ 、 $\Delta Q/\Delta C$ の増加をはかることにある。前述したように、生産製造プロセスまでの前処理を簡略化することで、異種産業間の回生原料連携は容易となり、例えばAl-Si合金・強度材を出力するアップリサイクリング(ΔQ の増加により高い価値増加を目指すリサイクルプロセス)では、家電・電装分野からの工業用純アルミ材、半導体分野からの種々のSi源の入力が可能となる。一方、こ

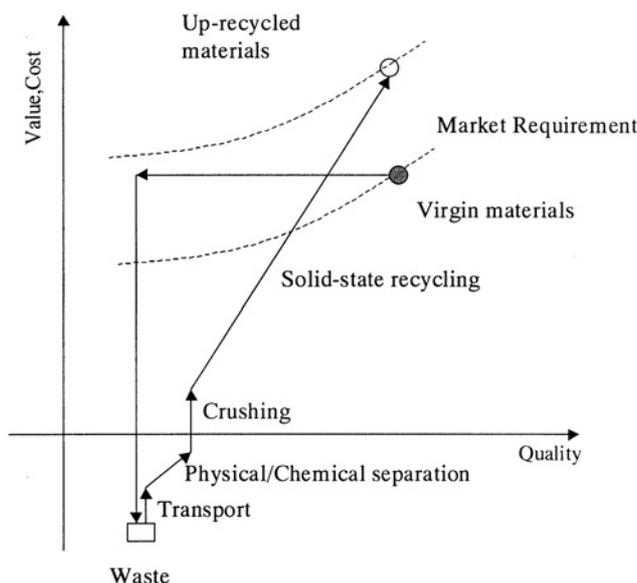


図1 価値-クオリティ・ダイアグラムにおける固相リサイクル

の新しいプロセスでは分級・種別・精錬など、通常の製造プロセスであれば膨大な工程となる前処理を省いているために、形態・形状が全く整っていない原料、異種材料間で調整していない原料、不純物の混入などが想定される。クオリティー増加のために原料の吟味、選別を行うことは許されず、したがって、出発原料の形態・形状に依存せず、非調質・非調整な異種原料を受け入れ、不純物混入があっても所定の特性を有する製品を創製できるロバストネスが求められる。加えて、軽量合金材料のようにリサイクル時に大きなエネルギーを投入できない原料系では、投入エネルギー量も自ずと制限される。

1つのソリューションが、固相のままに出発原料を微細化し、各相の構成単位を強度上昇機構が作用する程度の密度で成形加工を行うプロセスである。通常のリサイクルプロセスあるいは溶解-鋳造、溶解-粉化プロセスと異なり、すべての工程は固相のまま進行させ、力学的エネルギーを付与することで所定の自由エネルギー障壁を越え、微細粒化をはじめとする固相反応・組織制御などを促進させる。この理想的なプロセスを、ここでは研究者ら⁸⁻¹⁰⁾が開発してきたバルクメカニカルアロイング法 (Bulk Mechanical Alloying : BMA) により、比較的高密度での微細粒化を行う固相プロセスとして具現化する。

BFPプロジェクトの中で開発しているプロセスの模式図を図2に示す。回生原料を秤量後、そのままBMA用の金型ダイキャピティーへ投入し、所定のパススケジュールにしたがって、繰り返し荷重負荷を与える。通常BMAでは、1回の繰り返し荷重履歴中に、2回の圧縮モードと1回の前方押し出しモードを入れ、前者で所定の相対密度を保持し、後

者で強せん断ひずみを負荷する。微細粒化に直接影響するのは、後者であり、文献7)によれば、サイクルあたりの総エネルギーの中で約35~40%はこの段階での塑性仕事に費やされる。このエネルギー散逸に伴う内部エネルギー上昇により、固相反応、混合微細化、均一分散化などが促進されると考えられる。

BMA後の試料は、相対密度が80~85%程度であり、自動車部品など高強度部材の要求レベルの強度には不足しているため、粉末焼結鍛造プロセスにより緻密化とネットシェイピングを施し、最終製品形状まで仕上げる。その後、必要に応じて表面処理・表面改質などの予備プロセスも追加しなければならないが、この2段階プロセスで通常の粉末冶金プロセスを回生原料から出発してもカバーできる点、インプロセスでの組織制御による力学特性向上などに、技術インパクトがある。現在、より省エネルギー化を進めたBMAを開発中であるが、製造時エネルギー投与も最小化しつつ回生原料から高密度グリーン成形体を直接生産し、それをネット成形する固相リサイクルの高効率性は、 $\Delta Q/\Delta C$ を向上させる技術インパクトの特徴でもある。

3 モルフォロジーフリー微細粒化加工

この固相リサイクルの特徴であるモルフォロジーフリー微細粒化加工性を、ここでは、Al-Si系材料を対象として用いて具体的に示す。出発原料は、回生素材を模擬する目的で、Al-12%Si溶製材の切削チップとした。その形態を図3a)に示す。フレーク状の不規則な形態であることに加え、内部組織には溶解材特有の粗大なSi粒(約40~50 μ m)と針状Siが内在している。このモデル材料に反復して同一パターンで繰り返し負荷荷重を与えると、図4に示すように、初期の粗い組織は急速に変化し、100~200回のプロセス(すなわち約1~1.5ksのBMA)により、初期のSi粒径は5 μ m程度にまで微細化される。

この微細化に伴い、図5に示すように、BMA中のグリーン成形体の硬さも単調に増加していることから、インプロセスの組織制御で高強度化が促進されていることがわかる。

本プロセスの特徴の1つに、最終部品までのネット成形以前までは高密度グリーン成形体としてハンドリングできる点がある。実際、図3b)に示すように、相対密度85%を有する成形体として出力できる。BMA中の強せん断ひずみ加工により粒子間結合も強く、種々の2次成形も可能である。

自動車部品製造の場合には、この成形体を高速加熱後、温間で焼結鍛造することで、ネット成形する。本プロセスの場合には、図3c)に示すようなディスク状の緻密体を創製す

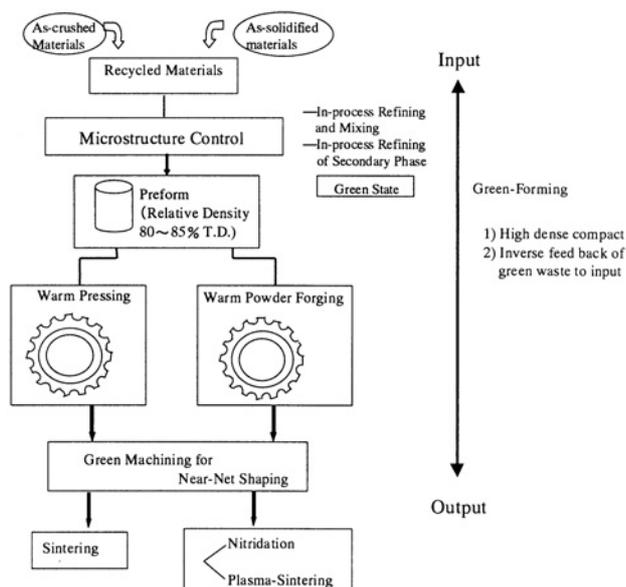


図2 バリアフリープロセスとして提案、開発している固相リサイクルプロセス

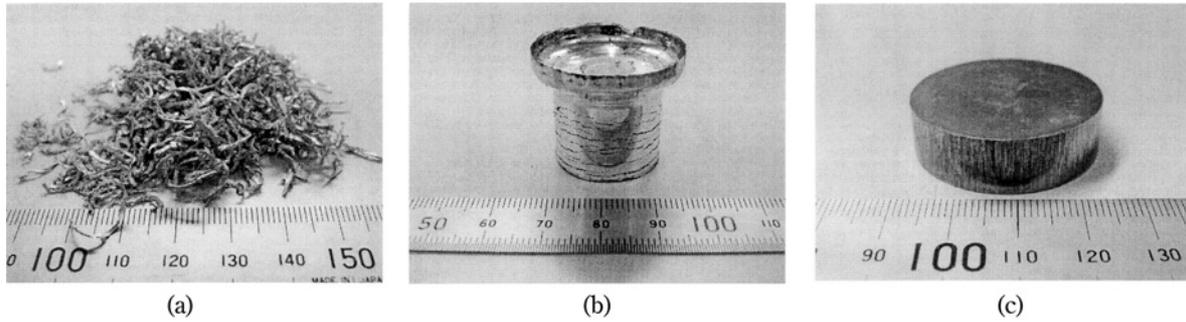


図3 Al-Si系材料におけるモルフォロジーフリー微細粒化加工
a) 出発原料(切削チップ原料)、b) BMAによる微細粒化加工後のグリーン成形体、c) 焼結鍛造プロセス後のビレット

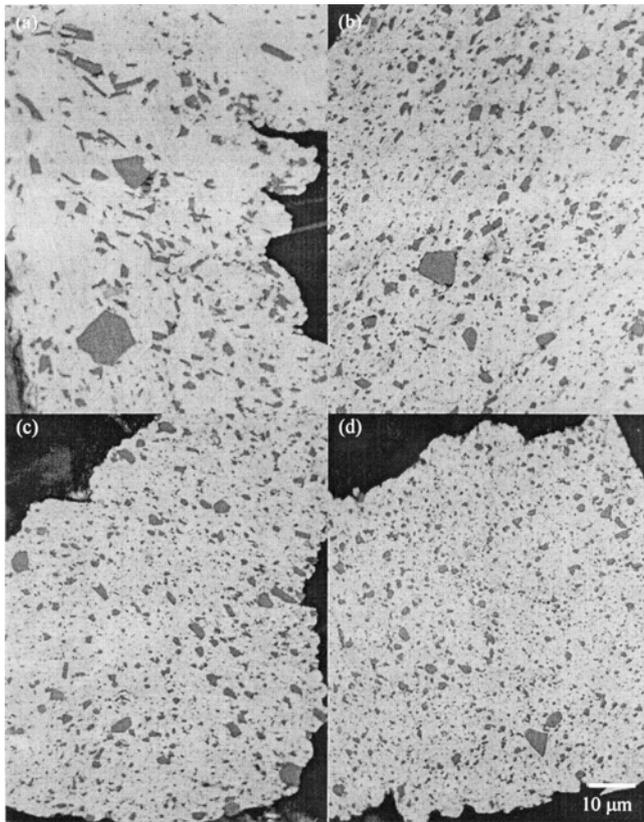


図4 イングロセスにおける微細化過程

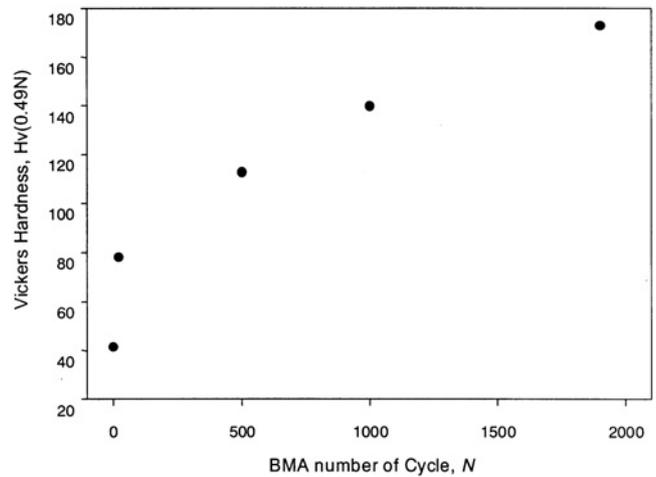


図5 モルフォロジーフリー微細粒化加工による
インプロセス強度上昇

ることができる。この段階で金型・ポンチ形状を適切に設定することで、種々の自動車部品への展開も無論、可能である。

文献12)にも述べているように、アルミニウムには鉄の不純物混入も想定されるが、4wt%程度までの鉄混入では、微細なAl-Feの金属間化合物が微細分散することで、強度低下ならず、むしろ分散強化の可能性を示している。

このように微細粒化加工は、固相リサイクルにおける強せん断変形を利用することで、インプロセスで微細な結晶粒組織を獲得でき、かつ第2相の微細化・化学反応による不純物無害化など、通常の製造プロセスでは多段工程でも実現が困難な過程を、1つのリサイクルで実行できるという特徴

4 おわりに

ここでは、アルミニウム材料を例にして回生原料のモルフォロジーフリープロセスについて解説したが、回生原料の形状・形態に依存しないプロセスは他の材料でも不可欠である。例えば、繊維状組織に釘など、異種材料が不可避免的に混入している廃材を新たな木質材料としてリサイクルするには、形状・形態という技術的規制を排除することが重要である^{13,14)}。バリアフリープロジェクトでは、対象とするマテリアル・セレクションの枠を拡大することを第1の主眼としてきた。その中で、それぞれの材料系に固有のリサイクル技術を考察することと並行して、回生原料からのアップサイクリングに共通する技術インパクトを追求している。特に、

多くの材料のインプロセス制御が、原子・分子レベルの構造制御よりもむしろ、メゾスコピックな組織制御によることから、共通の技術インパクトの基盤として種々のメゾスコピックな組織制御技術に注目している¹⁵⁾。今後は、この組織制御性に関しても、種々の材料科学領域の研究者・技術者からのご指摘、ご批判を仰ぎたい。

謝辞

本研究は、科学技術振興調整費「材料の低環境負荷ライフサイクルデザイン実現のためのバリアフリープロセッシング技術に関する研究」によることを付記する。

参考文献

- 1) 平成11年度科学振興調整費・研究成果報告書, (社) 未踏科学技術協会 (2000)
- 2) T. Gutowski : Mater. Trans, (2002), in press
- 3) T. Aizawa, K. Halada and T. Gutowski : Mater. Trans, (2002), in press
- 4) WTEC Panel Report on Environmentally Benign Manufacturing, Baltimore, (2001)
- 5) T. Aizawa : Proc. 4th International Conference on ECOMATERIALS, Nov., Gifu, (1999), 75.
- 6) T. Aizawa, T. Luangvaranunt and K. Kondoh : Envi-

- ronment Conscious Materials ; Ecomaterials, Proc. COM-2000, Ottawa, Canada, (2000), August, 73.
- 7) 相澤龍彦, T. Luangvaranunt, 近藤勝義 : 日本金属学会誌, 65 (2001), 581.
- 8) T. Aizawa, K. Tatsuzawa and J. Kihara : J. Faculty of Engineering, University of Tokyo, XLII (1993), 57.
- 9) O. Kobayashi, T. Aizawa and J. Kihara : Mater. Trans. JIM 37, (1996), 1497.
- 10) T. Aizawa and C. Zhou : Advanced Engineering Materials. 2, (2000), 29.
- 11) T. Aizawa, J. Kihara and D. J. Benson : Mater. Trans. JIM 36, (1995), 138.
- 12) T. Aizawa, T. Luangvaranunt and K. Kondoh : Mater. Trans, (2002), in press
- 13) 大越 誠 : 平成12年度科学振興調整費・研究成果報告書, (社) 未踏科学技術協会, (2001) 51.
- 14) Y. Hiramatsu, A. Miyatake, T. Fujii, Y. Wei and B. Tomita : Mater. Trans, 43 (2002), in press
- 15) 相澤龍彦 : バリアフリープロセッシング研究会資料3/4, (2002)

(2002年1月4日受付)