

システム技術開発調査研究

14-R-13

産業競争力向上のための金属材料の形質 融合製造技術体系化に関する調査研究

報 告 書

・ 要 旨 ・

平成15年3月

財団法人 機 械 シ ス テ ム 振 興 協 会

委託先 財団法人 製造科学技術センター

序

わが国経済の安定成長への推進にあたり、機械情報産業をめぐる経済的、社会的諸条件は急速な変化を見せており、社会生活における環境、防災、都市、住宅、福祉、教育等、直面する問題の解決を図るためには、技術開発力の強化に加えて、ますます多様化、高度化する社会的ニーズに適応する機械情報システムの研究開発が必要であります。

このような社会情勢に対応し、各方面の要請に応えるため、財団法人 機械システム振興協会では、日本自転車振興会から機械工業振興資金の交付を受けて、経済産業省のご指導のもとに、機械システムの開発等に関する補助事業、新機械システム普及促進補助事業等を実施しております。

特に、システム開発に関する事業を効果的に推進するためには、国内外における先端技術、あるいはシステム統合化技術に関する調査研究を先行して実施する必要がありますので、当協会に総合システム調査開発委員会(委員長 放送大学 教授 中島尚正 氏)を設置し、同委員会のご指導のもとにシステム技術開発に関する調査研究事業を民間の調査機関等の協力を得て実施しております。

この「産業競争力向上のための金属材料の形質融合製造技術体系化に関する調査研究報告書」は、上記事業の一環として、当協会が財団法人 製造科学技術センターに委託して実施した調査研究の成果であります。

今後、機械情報産業に関する諸施策が展開されていくうえで、本調査研究の成果が一つの礎石として役立てば幸いです。

平成15年3月

財団法人機械システム振興協会

はじめに

我国の素形材産業および金属加工産業の多くは、溶解・凝固・再加熱・成形・冷却・切削などを繰り返す従前型の製造・加工技術に立脚しており、資源・エネルギー効率の低い生産を続けています。かかることから、これら産業は、我国の産業用エネルギーの30%以上を消費し、環境に対し多大な負荷をかけ続けています。

同時に、エネルギー価格や人件費の高い我国の素形材並びに金属製品は、国際的にみて競争力を失いつつあり、このことが、我国にとって、単に素形材産業のみならず、広く機械産業全体の競争力の低下の一因ともなっています。このままの状況が続けば、我国の素形材産業や金属産業は、遠からずその存在基盤を失い、完全に衰退する危険をはらんでいます。しかしながら、一国の工業の根幹をなす素形材産業の衰退は看過されるべきものではなく、その技術力と競争力の再構築は、我国にとって焦眉の急を要する問題です。

この問題への対応は、これまでに我国が得意としてきた従来型技術の改良・改善的取組によってはなし得ず、関連技術体系の根本的な組み替えあるいは再構築によってはじめてなし得るものであると理解しなければならない。すなわち、従来型の鋳造、鍛造、圧延、切削、などの各個技術の改良・改善を繰り返しても、それによって期待できる効果は限定的であり、問題の根本的解決にはつながらないと云えよう。

本調査研究が体系化と実現を目指す金属材料の形質融合製造・加工技術とは、精錬後の金属溶湯から目的とする素形材あるいは最終製品を直接的に製造する創形創質凝固制御技術と創形創質塑性流動制御技術とを融合した金属製品の高効率製造・加工技術であり、金属材料の製造・加工技術の新しい体系化を目指すものです。

本調査研究では、この金属材料の形質融合製造・加工技術について、現状で想定される関連加工技術について、網羅的に考案し、それらの構造、枠組、特性、問題点などについて整理し、上記技術体系の実現のために必要な基盤技術、要素技術を抽出することを目的としています。更に今後の基盤技術、要素技術の開発とそれらを活用した実製造プロセスの構築について検討し、実現した場合の製品競争力向上効果や環境負荷低減効果の算定につなげていくことを目指しています。

平成15年3月

財団法人製造科学技術センター

目 次

序	1
はじめに	2
目次	3
1 調査研究の目的	4
2 調査研究の内容	4
3 調査研究の実施体制	5
4 調査研究の要旨	9

1 . 調査研究の目的

我が国の素形材産業の多くは、金属材料の溶解・凝固・再加熱・成形・冷却・切削などを繰り返す従前型の製造・加工技術に立脚しており、産業用エネルギーの30%以上を消費し、環境に対し多大な負荷をかけ続けている。

また、エネルギー価格や人件費の高い我が国の素形材は、国際的にみて割高である。このことが、我が国にとって、単に素形材産業のみならず、広く機械産業全体の競争力の低下の一因ともなっている。このままの状況が続けば、遠からずその存立基盤を失い、完全に衰退する危険をはらんでいる。

しかしながら、一国の工業の根幹をなす素形材産業の衰退は看過されるべきものではなく、その技術力と競争力の再構築は焦眉の急を要する問題である。

この問題への対応は、これまで我が国が得意としてきた従来型技術の改良・改善的取組によってはなし得ず、関連技術体系の根本的な組み替えあるいは再構築によって、はじめてなし得るものであると理解しなければならない。すなわち、従来型の鑄造、圧延、切削、鍛造などの加工技術の改良・改善を繰り返しても、それによって期待できる効果は限定的であり、問題の根本的解決にはつながらないと考える。

本調査研究事業が体系化と実現を目指す金属材料の形質融合製造・加工技術とは、精錬が終了した金属溶湯から目的とする素形材あるいはニヤネットシェーブ製品を直接的に製造する創形創質凝固制御技術と創形創質塑性流動制御技術とを融合した金属製品の高効型率製造・加工技術であり、金属材料の製造・加工技術の新しい体系化を目指すものである。本調査事業では、この金属材料の形質融合製造・加工技術について、現状で想定される全ての技術について、網羅的に考案し、それらの構造、枠組、特性、問題点など設について整理し、技術体系実現のため必要な要素技術開発課題を抽出することを目的とし、さらに今後の要素技術の開発、製造装置の試作、実現した場合の製品競争力産向上効果や環境負荷低減効果の算定につなげていくことを目的とする。

2 . 調査研究の内容

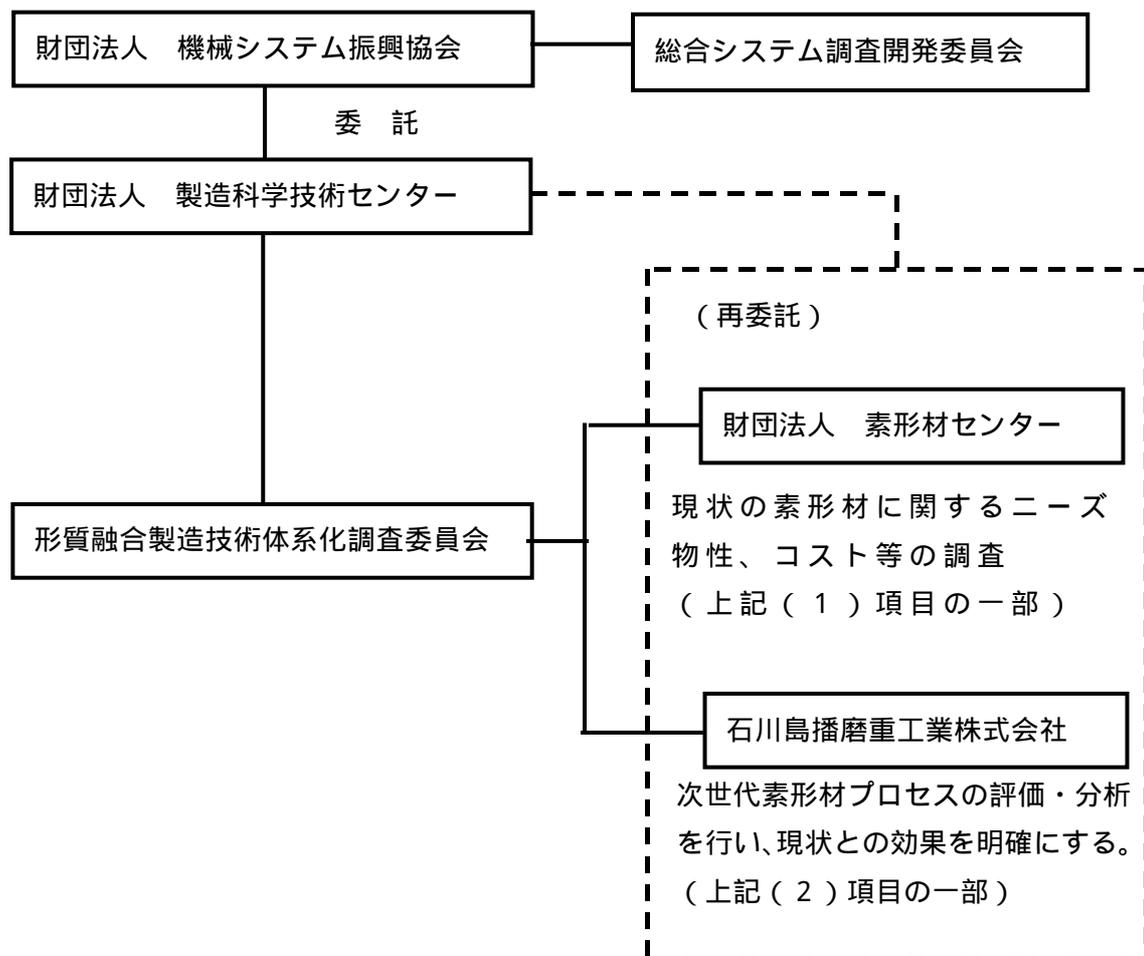
本調査研究事業は、以下の3項目に関して、調査研究を行った。

- (1) 金属材料の形質融合製造技術の現状の技術動向を調査し、分析、加工、体系化を行った。
- (2) 上記調査結果を基に、想定される全ての形質融合加工技術を抽出し、各技術の具体的な構造、予想される特質や問題点、実現へのロードマップ、解決すべき課題、実現した場合の効果試算などを纏めた報告書を作成した。

(3) 形質融合製造・加工技術の体系化とその実現を図るために、要素技術および全体技術の具体的な開発目標、手法、組織体制などについての提案を行った。

3. 調査研究の実施体制

(財)製造科学技術センター内に、当分野に知見を有する学識経験者、国公立研究所、企業等からなる「形質融合製造技術体系化調査委員会」を設け、分析、討議を行い、具体的作業をすすめることにより、成果をまとめ報告書を作成する。また、検討素地となる素形材に関するニーズ、物性、コストについての基礎調査を(財)素形材センターへ、また、次世代素形材プロセス評価分析を石川島播磨重工業(株)へ委託を行い、現素形材プロセスと次世代型素形材プロセスの評価を調査し、そのデータを基に委員会にて次世代型最適素形材プロセスの課題抽出等を行う。



4. 総合システム調査開発委員会委員名簿

(順不同・敬称略)

委員長	放送大学 教養学部 教授	中 島 尚 正
委 員	政策研究大学院大学 政策研究科 教授	藤 正 巖
委 員	東京工業大学 大学院総合理工学研究科 知能システム科学専攻 教授	廣 田 薫
委 員	東京大学大学院 工学系研究科 助教授	藤 岡 健 彦
委 員	独立行政法人産業技術総合研究所 つくば東事業所 管理監	野 崎 武 敏
委 員	独立行政法人産業技術総合研究所 つくば中央第2事業所 管理監	太 田 公 廣

5 . 形質融合製造技術体系化調査委員会名簿

委員長	木内 学	木内研究室 帝京平成大学教授
幹事	清水 透	独立行政法人 産業技術総合研究所 機械システム研究部門 循環型材料加グループ
委員	中村 保	静岡大学 工学部 機械工学科 教授
	市川 洌	独立行政法人 産業技術総合研究所 機械システム研究部門 循環型機械材料研究グループ長
	中野 隆志	アイダエンジニアリング株式会社 技術企画室 室長
	安達 充	宇部興産機械株式会社 技術開発センター 企画・管理グループ グループリーダー
	牛込 智章	虹技株式会社 技術部 研究開発グループ グループ長
	神戸 洋史	日産自動車株式会社 パワートレイン技術開発 鋳造技術主管
オブザーバー	荻布 真十郎	財団法人 素形材センター 常務理事
	岡野 忍	財団法人 素形材センター テクニカルアドバイザー
	笹谷 純子	財団法人 素形材センター 技術課長
	外山 良成	石川島播磨重工業株式会社 技術企画部 ナショナルプロジェクトグループ 課長
	百々 泰	石川島播磨重工業株式会社 生産システム事業部 機械設計部 圧延機グループ
経済産業省	池田 秀俊	製造産業局 素形材産業室
	高橋 和博	製造産業局 素形材産業室 素形材製品1 係長
	吉田 健一郎	製造産業局 産業機械課 課長補佐
	飯濱 美夏	製造産業局 産業機械課 技術係長
事務局	高橋 慎治	財団法人 製造科学技術センター 生産環境室 主席研究員
	間野 隆久	財団法人 製造科学技術センター

調査研究部 課長代理
伊藤 香織 財団法人 製造科学技術センター
調査研究部

6 . 委員会実施内容

本調査研究の検討や調査に関し以下の日程で作業を行った。

平成14年11月	1日(金)	第1回	委員会開催
平成14年11月	29日(金)	第2回	委員会開催
平成15年	1月9日(木)	第3回	委員会開催
平成15年	1月28日(火)	第4回	委員会開催
平成15年	2月25日(火)	第5回	委員会開催

技術動向調査

平成15年	1月	8日(水)	宇部興産機械株式会社
平成15年	1月	9日(木)	虹技株式会社

4 調査研究の要旨

1 . 形質融合製造技術動向調査

1 . 1 形質融合製造技術の基本的考え方とその特性

1.1.1 形質融合の意義と狙い

金属製品の製造技術およびプロセスがそれぞれの過程において原材料は次第に目的とする形状・寸法を付与され、必要な強度特性や表面性状その他の品質を獲得しつつ、製品化されていく過程は、金属加工技術の体系そのものである。しかし、金属加工産業は、過去四半世紀の間、質・量ともに目覚ましい発達を遂げてきたが、金属加工技術やプロセスそのものにも疲労感・行詰まり感が意識されるようになってきた。 我国の金属加工技術の多くは、まさにこの高度化から飽和の段階を迎えているが、この状況を打破するためには、これまで蓄えてきた知識・能力を最大限に活用して、将来へ続く道を切り開く以外に採り得る道はない。そのための最も有用な手段あるいは有効なコンセプトは、各技術の“形”と“質”すなわち構造と機能の“転換”とそれらをふまえた“融合”の推進である。

現状を注意深く見れば、各個技術が発展限界に近づきつつある一方、これまでの発展の過程でそれらの中に高度に蓄積された技術的なポテンシャルを駆動力として、それらの構造と機能の自律的転換と複数技術の融合による革新と創造の可能性が増大していることが分かる。

本調査研究が目指す形質融合製造技術の開発は、以上の如き現状認識を踏まえ、我国の金属加工技術が積み上げてきた高度な技術ポテンシャルを活かして、各個技術の構造と機能すなわち形・質の根本的な転換を実現しつつ、複数技術の融合を図り、その中から、従前技術が達成出来なかった金属製品の製造システム的大幅な組替を実現し、以って我国の金属加工技術ひいては製造業に新しい競争力を獲得しようとするものである。

1.1.2 創形度と創質度

、被加工材が加工を通して獲得する構造と機能を“形”と“質”という概念でとらえることが出来る。以下、実際の製造過程や加工プロセスの中で、被加工材が製品へ向かって獲得していく形と質の度合（完成度ということもできる）を“創形度又は創形率”と“創質度又は創質率”という言葉で表現する。すなわち、“創形度”とは、原材料から最終製品に至る形の創製に要する作業量又はエネルギー量を 100 とするとき、形の創製度を相対的に表わす値であり、“創質度”とは、同じく質の創製の度合を表わす相対値である。

従来技術の形質を転換しその融合を促進することを通して、現状を打破し、限界の突破を目指す形質融合製造技術の第1の目標は、それを構成する各個技術による創形度と創質度を極力高めることである。即ち、それぞれの技術の構造を拡大し、機能を強化し、目的とする最終製品により近い製品を一気に作り出す能力を高めることである。その上で、第2に、それらの能力を適切に組合わせて、最も合理的に、最も効率的に所要の製品を作りだすプロセスやシステムの構築を目指すことにある。

1.1.3 各個（要素）技術とそれらの連関

形質融合製造技術の体系を構成する各個技術は、従前技術の形・質の転換および融合によって進化した技術として位置付けられるが、その特徴は（1）それら一つ一つの技術による創形度および創質度が、従前技術に比して著しく高められている、（2）その結果、それらを組合

わせた製造工程や加工プロセスが高度に効率化されており、生産性に優れている、(3) そのような高い加工機能を活用することにより、溶湯から製品に至る過程が、従前に比して大幅に短縮され、エネルギー消費の最小化を実現したプロセスとなっている、ことなどにある。

1.1.4 期待される効果と課題

形質融合製造技術の開発の狙いは、既述の如く次の2点に集約できる。

- (1) 各個技術の形・質の転換と融合を進め、その創形能力および創質能力を極力高める。
- (2) (1)により進化した各個(要素)技術あるいは製造プロセスの最適な組合せとシステム化を図り、製造機能と製造効率の最大化を実現する。

これによって得られる効果は、

- (1) 製造機能の最大化により、最も形・質に優れた製品を製造することができる。
- (2) 製造効率の最大化により、最も競争力に優れた製造技術と製品が獲得できる。
- (3) 製造機能と製造効率の最大化により、最も省エネルギー・省資源効果の高い製造技術と製品を得ることができる。
- (4) 従来技術が成し得なかった新製造技術体系を構築することにより、金属製品のより広い利用体系の創造が可能になる。
- (5) 溶湯から製品までの一貫した製造体系を完結することにより、規模によらない循環型製造プロセスの構築が可能となり、先進国、後進国を問わない産業発展の基盤を提供できる。

1.2 高速噴射法による新レオキャスト技術

金属・合金の凝固過程で加工熱処理を加えて、結晶粒を微細化制御し、鑄塊全体のミクロ組織を均質化させる新しい鑄造方法にはレオキャスト法として知られるセミソリッド加工法がある。溶湯の冷却速度と攪拌棒の回転速度を高速化させるバッチ式攪拌凝固法によれば、この手法により結晶粒が微細化した高延性材料が創製される。しかし、質量のある鑄塊では、冷却速度に限界があるために、結晶粒を数10 μ m以下に微細化するのが極めて困難になる。そこで上述した結晶粒の微細化による材料特性・性能の改善を達成するために、また鉄合金を始めとする高融点合金のセミソリッド加工をも可能にするために攪拌合成法の改良を試みた。高速回転する回転子の上に溶融合金が流下する熱衝撃を最小限に抑えるために、射出成形法を応用した。溶融合金を高速回転するスクリー状の攪拌棒で噴霧状の液滴とし、同時多発的に結晶生成させ、そのセミソリッドスラリーを出口側の押出ノズルから押し出す、高速噴射を伴う新レオキャスト技術を考案した

1.2.1 高速噴射法による半凝固スラリー製造

高速噴射を伴う新レオキャスト法では、溶解室において加熱溶解された溶融金属材料を、上記溶解室から攪拌室に導入し、この攪拌室への導入の際に、攪拌室内において高速で回転駆動されるスクリー状の攪拌棒における当該スクリーとの接触により噴霧状の液滴とする。攪拌室内においては固相率が0~60%まで固液共存温度範囲で攪拌棒により短時間攪拌し、一定温度まで過冷却状態にしてその温度で同時多発的に結晶生成させる。その金属材料を固液共存状態のまま出口側の押出ノズルから押し出し、微細結晶粒を有する状態で直ちに急冷凝固させながら連続的にフィードストック(母材)や半製品を製造する。

1.2.2 低融点金属用高速噴射新レオキャスト法

低融点金属用の高速噴射新レオキャスト法は、溶解室において加熱溶解された溶解金属材料を溶解室から攪拌室に導入し、この攪拌室内において、少なくとも 500rpm 以上の高速で回転駆動されるスクリー状の攪拌棒により、60 秒以内の短時間攪拌した上で、その金属材料を固液共存状態で出口側の押出ノズルから押し出し、このノズルから押し出された固液共存状態の金属材料を、直ちに鋳型に注入してフィードストック（母材）か、ロール等により急冷凝固させながら半製品を直接製造する方法である。

1.2.3 高融点金属用高速噴射新レオキャスト技術

(1) 高速噴射半凝固スラリーとフィードストックの製造

固液共存域で攪拌することにより部分凝固の状態にある連続鑄造用の金属スラリーを、駆動装置により回転駆動されるスラリー移送用スクリーを備えた送給装置によって、強制的な流動を与えながら成形工程に連続送給し、成形する連続鑄造用金属スラリーの連続的成形方法が提案されている。

(2) 半溶解鍛造法による半製品製造技術

室温においてフィードストックから切り出した適量の試料をショットチャンバーに挿入して、固液共存温度域あるいは高温固相領域に加熱し一定の温度で鍛造を行い、複雑形状の半製品を製造することにより高融点金属でもセミソリッド加工が可能となる。

(3) 溶解押出し法による半製品製造技術

固液共存域で攪拌することにより部分凝固の状態にある連続鑄造用の金属スラリーを、駆動装置により回転駆動されるスラリー移送用スクリーを備えた送給装置によって、強制的な流動を与えながら成形工程に連続送給し成形する、連続鑄造用金属スラリーの連続的成形方法が提案されている。

(4) 高速噴射半凝固スラリー製造用基本モデルの設計

高融点金属用高速噴射半凝固/薄板直接製造方法は、鉄系合金を溶解後、その凝固中に攪拌して製造した均質微細な結晶粒を持つ半固体スラリーを既設のロータリーキャスターのツイーンロールへ注入、押し出すことによって、ナノ結晶粒組織を持つ金属材料を創製する方法である。

1.3 ニューレオキャストスラリーを応用した技術およびその展望

1.3.1 各種レオキャストスラリーの製造法

固液共存状態で成形する方法としては、一旦溶湯を凝固させてピレットを作成し再度加熱して固液共存状態の素材を成形するチクソキャスト法と溶湯から直接固液共存状態の素材を製造した後成形するレオキャスト法の2種類がある。工業的には生産性と半凝固、半溶解素材の品質から限定された方法が採用されている。ただチクソキャスト法においては最初に実用化された成形方法であるが、コスト高のためにその使用が限定されているのが実情である。一方、チクソキャスト法のコストの問題を解決して品質、生産性の問題を解決する方法として開発されてきたレオキャスト法は現在二つの方法が実用化されている。以下に同法の特徴とその応用技術および展望について述べる。

1.3.2 ニューレオキャスト法の特徴

(1) プロセスと装置

融点に対する過熱度が30 未満の融点直上の結晶微細化剤 Ti が添加された溶湯を金属容器に静かに注湯し、液中に結晶核を発生させる。目標成形温度まで容器外部よりエアブローにより所定の速度で冷却する。容器内部の半凝固スラリー各部位の温度を均一にするために、注湯直後の温度が低いあるいは冷却しやすい部位をセラミックにより保温し、容器内のスラリー温度が目標値に近づいた段階で最終の温度調整のため高周波誘導装置を使用する。このプロセスで結晶の核を発生させ、それを消滅させないことが重要なポイントとなる。

(2) ニューレオキャストスラリーの特徴

(1)金属容器外部からエアブロー、(2)金属容器の上部、下部保温、(3)高周波誘導装置による加熱により、注湯してから3分経過後の保持容器内のスラリー温度はほぼ均一になり、しかも金属容器にメタルを付着させることなく容易に金属容器から排出される。

ニューレオキャストスラリーの応用

上記のように均一な温度のスラリーが連続的にできることからいろいろな製品に適用が期待できる。

(1) 成形法から見た適用方法

成形する方法としては、鋳造法、鍛造法、押出法の3種類に区別される。鋳造法は最も製品の適用範囲が広い成形法と考えられる。鍛造法は製品の形状によっては、鋳造法よりも成形品の機械的性質、コスト、製品歩留まりの観点から将来が期待される方法である。押出法は1)加工力を著しく低下させ、単一工程で高加工度を可能にする、2)成形された製品の機械的性質は熱間加工材に近い、などの報告がある。

(2) 製品から見た適用方法

生産される製品の形状、大きさから分類すると、自動車の部品では薄肉部品、薄肉大型部品、肉厚重要保安部品、肉厚耐圧部品が中心になる。

(3) 材料から見た適用方法

アルミ合金では、高強度合金、中強度高延性合金、耐熱合金、耐磨耗合金、耐食性合金に適用されている。

1.3.4 今後の展望

現在、自動車メーカーは部品のグローバル化を世界規模で積極的に進めており、部品の要求品質特性を満足する低コストの成形法を検討している。このため、各社は生き残りをかけて種々の新技術を積極的に開発中である。このような状況の中、ニューレオキャスト法は、収縮巣、偏析の発生が少ないこと、金属組織が細かいこと、酸化物の混入が少ないなどの優れた品質上の特徴を有すること、半凝固状態で成形することから高サイクルでの成形が可能であること、から低コストの成形法として自動車軽量化に対応できる方法と考えられる。ただし、ニューレオキャスト法は優れた特徴を持つ成形方法であるが、原料となるスラリーの粘度は高く、またその熱容量は小さい。このため、高い品質の製品を得るための成形技術、製品の品質を維持管理するための工程管理の技術が求められている。

1.4 鉄-炭素系材料における高炭素領域での半溶融鍛造

1.4.1 はじめに

鉄系合金においても半溶融成形法数多くの研究が行われているが、現段階では実用化には至っていない。これは鑄鉄の場合でもおよそ 1150 以上の高温であるため、成形型等に用いる高温で高圧に耐え得る材料の耐久性および成形装置に問題があるためである。しかし、最近では銅合金を成形型に用いた例もあり実用化に向けた試験が続けられている。一方、半溶融成形法と半凝固成形法の比較では、自動車用部品のように大量生産を前提にすると、鉄系材料においても半凝固成形法がエネルギーのロスが少なく有利であるが、小規模で小ロットへの対応を考えた場合には、必要な時に必要な数量だけ処理できる半溶融成形法の方がエネルギー消費が少なくなる場合もある。

1.4.2 半溶融鍛造法の概略

炭素含有量を多くすることで、固液共存領域が広がり、広い固液共存領域は成形可能な固相率を得るための温度はばを持たすことが可能である。そのため、鉄-炭素系材料は半溶融加工に適した材料である。半溶融鍛造法は半溶融鑄造法にくらべ、型の耐久性で優位性があり、半溶融鑄造に比べ高固相率での成形が可能となる。

1.4.3 材 料

(1) 成 分

半溶融鍛造の場合には、より大きな荷重を加えることができるので、固相率にも影響されるが、1 から 2.5%程度の炭素でも成形可能と思われる。この領域では温度に対する固相率の変化が少ないためピレットのハンドリングから成形までを比較的余裕を持っておこなえる。

(2) 組 織

加熱後の組織はオーステナイト粒界周辺のパーライトと、およびオーステナイト粒界沿って薄いフィルム状に炭化物が晶出した組織となっている。ここでパーライトと炭化物であった部分は半溶融状態において液相であった部分であり、粒状に近い固相粒を囲むように分布していたことを示している。

1.4.4 プリフォームの製法

プリフォームには微細で均一な組織を有していることが要求される。製造時の凝固速度が小さい場合には黒鉛を生じることがあるが、黒鉛が粗大な場合には、半溶融状態に加熱中に黒鉛周辺から優先的に液相が生じやすくなり、液相の偏析が発生し、プリフォームの形状がくずれたり、ハンドリングに支障をきたす場合がある。ニアネットシェープという面では金型鑄造によるプリフォームの製造が望ましい。

1.4.5 プリフォームの加熱

プリフォームを所定の半溶融温度に加熱するには高周波加熱等により急速加熱し、固相の成長を防止するとともに、表面の酸化を防ぐ必要がある。炭素含有量により、プリフォーム組織は初晶オーステナイトがデンドライト状となる場合があるが、このような組織においても、加熱のみでデンドライト状から粒状へと変化し、チクソトロピー性を有する流動性のよいスラリーが得られる。この状態での固相率はプリフォームから液相が流れ出ることのないよう形状を保ち、成形機までハンドリングするのに必要な保形性と成形過程での流動性とを兼ね備える必要があり、半溶融鍛造における成形条件によるが、想定される固相率は 0.3 から 0.6

程度と考えられる。

1.4.6 半凝固鑄造

少量生産に対応するには半凝固鍛造よりも半溶融鍛造の方が、適している。また、高温溶湯の取り扱いが不要で、固相率の制御が容易である。今後、半溶融鍛造が技術確立され、少量生産から大量生産に移行すると、よりエネルギー消費量が少ない半凝固鍛造が求められる。

1.4.7 まとめ

鉄・炭素系材料の半溶融鍛造について調査を実施し、通常の熱間鍛造に用いられる鋼に比べ高炭素領域の材料を用いれば固液共存領域が広く、半溶融成形に適した材料であることが推測された。現在のところ、試験例は少ないので、今後、炭素含有量と成形性、材料特性の評価が必要である。

1.5 セミソリッド成形と鍛造技術

形質融合製造技術の究極のプロセスは「溶湯の状態から直接目的とする製品を製造する」点にある。即ち、中間工程での加熱工程を排し、溶湯から半凝固成形、熱間成形、冷間成形を経て目的製品に至る加工工程の流れをシステム化し、溶解精錬のために投入した熱エネルギーを最大限に活用し得る加工プロセスを構築することにある。

1.5.1 鍛造技術の現状と課題

熱間鍛造による生産量は180万トンで、62%を占め、この熱間鍛造における鍛工品の原単位（製品重量当たりのエネルギー消費量）14.4MJ/kg（0.20kgC換算/kg鍛工品重量）の中のピレットの加熱に要するエネルギー消費は89%にも達する。また、その材料歩留まりは約87%である。

このような現状において、鍛造加工の立場から、形質融合製造技術に向けた基本的な考え方は、

- 1) 溶湯から直接ピレットを製造し、原単位およびCO₂排出量が大幅に削減してEFM化を達成する。
- 2) 熱間鍛造品を冷間鍛造化することにより原単位およびCO₂排出量が削減する。
- 3) 熱間鍛造が避けられない場合には、ピレットの加熱効率と材料歩留まりを最大限に上げる。
- 4) 廃棄物低減の観点からは、無潤滑での鍛造が実現できれば、理想的である。

1.5.2 セミソリッド成形の現状と課題

セミソリッド成形は次に示すような特長をもっているため、溶湯金属鑄造の問題点を解決する、形質融合技術として注目されている。

- 1) 液相金属のみの状態よりも見掛け粘度が高く、ダイカスト時にガスの巻き込みが少なく、またセラミック等の分散強化材の混合も容易である。
- 2) せん断力を加えると見掛けの粘度が低下し、溶湯のみのような流動性を示す。
- 3) 凝固潜熱がすでに放出されているため、凝固時間が短くなり、凝固組織が微細になるとともに、鑄片の割れやマクロ偏析が生じにくい。
- 4) 凝固収縮量が少なくなるので寸法精度が良く、ひけ巣等の欠陥も少ない。
- 5) 加工工具への熱負荷が少ないので、金型寿命が延びる。

1.5.3 セミソリッド状態での成形と鍛造技術の融合

従来から鑄造材を鍛造のslagとして使用する試みはあったが次の理由で成功例はきわめて少ない。

- 1) slagを加熱するとひけ巣の中に残留している気体が膨張して表面が痘痕になる。
- 2) サイジングのみでは表面粗さは改善されず、押し出しのように塑性流動が必要になる。
- 3) 偏析や樹枝状晶の相が不均一に分散しているので変形能が小さい。

セミソリッド状態の金属塊は、上記の鑄造欠陥を補っており、鍛造のプリフォーム材に適する

1.5.4 セミソリッド金属の成形に使用される鍛造設備

- (1) 工法 ここで使用される工法はほとんど型鍛造の半密閉据込みになる。
- (2) プレス機械、半密閉据込みにはスライドの下死点付近で速度が最も遅くなるナックルジョイントプレスが適する。

1.5.5 半溶融ダブル鍛造法のターゲット製品

半溶融ダブル鍛造法ターゲットを(1) 複雑形状への対応を求められる製品、(2) 高精度への対応を求められる製品、にわけて紹介する。

1.5.6 まとめ

鍛造成形品は高強度で、押し出し品はさらに高精度が可能であるが、コストが高い。従来からプロセスカットのために鑄造slagを使用する発想はあるが根本的に成形性に問題があった。セミソリッド成形は形状対応性と微細球状化組織で鑄造の欠点を補い、鍛造技術と融合することにより、熱エネルギー低減としてのプロセス融合だけでなくネットシェイプ成形の可能性が高まる。1200～1400 の半溶融鍛造の課題はあるが傾斜機能材料の金型への採用も始まっており、形質融合製造技術として期待が高い。

1.6 溶湯からのアトマイズによる形質創生融合技術

1.6.1 はじめに

多くの金属材料は溶湯から鑄造の過程を経て製造されるわけであり、精錬された溶湯を直ちにアトマイズし、連続して成形を行っていく事ができれば、コストやエネルギーの投入を低くおさえながら、材料品質まで制御された成形プロセスを確立していける可能性がある。現在、このような目的で試みられている技術として、アトマイズされた溶湯を冷却速度を上げる目的でさらに双ロールにより衝突させる方法 (Alcoa Flake Process) がある。さらに、アトマイズした粉末を基板上に堆積させながら急冷凝固させていくスプレーフォーミングの方法があり、その中でも英国 Osprey Metal 社のオスプレー法が有名である。さらに、国内で独自に開発が進められている手法として、産業技術総合研究所で開発されている噴射成形法がある。

1.6.2 アルコア法・双ロール法からのプロセス

アトマイズにより生じた液滴を回転している双ロールに衝突させて冷却速度を速め、粉末を製造する手法である。この方法により製造される粉末はフレーク状となる。

1.6.3 オスプレイ法

スプレーフォーミングとして実用化された手法としてはオスプレイ法が広く知られている。溶融金属を窒素やアルゴン等の不活性ガスによりアトマイズし、液滴を急冷凝固させる。同時にこのアトマイズされた液滴をコレクタ上に堆積させてプリフォームを形成する。

(1) 国内におけるオスプレイ法の応用事例

a. 住友重機械

住友重機械においてはオスプレイ法の圧延ロール（オスプレイロール）への適用が行われている。オスプレイロールにおいてはロール表面に高炭素含有量の高速度鋼をスプレイしている。

b. コベルコ科研

コベルコ科研においては液晶用パネルを作製する過程でのスパッタリング処理のターゲット材料としてのアルミニウムターゲットをオスプレイ法より作製している。

(2) 世界におけるオスプレイ法による生産事例

全世界でのオスプレイ法による生産事例を、アルミニウム合金、銅合金、銅特殊鋼、スーパーアロイ、ステンレス・ニッケル合金に分類してまとめた。

1.6.4 射成形法

産業技術総合研究所機械システム研究部門で現在研究開発されている手法として、溶融金属をスプレイするのではなく、溶融紡糸法を発展させた手法として噴射成形法（Ejection forming Process）が開発されている。この方法は坩堝内から噴射された極細線を急冷凝固するのではなく、液層あるいは固液共存状態でコレクター上に堆積凝固させる方法である。

2．形質融合製造技術の課題抽出及び評価

2．1 形質融合技術の将来に向けた課題

2.1.1 高速噴射法による新レオキャスト技術の開発

高速回転する回転子の上に溶融合金が行下する熱衝撃を最小限に抑えるために、溶融合金を高速回転するスクリー状の攪拌棒で噴霧状の液滴とし、同時多発的に結晶生成させ、その半凝固スラリーを出口側の押出ノズルから押し出す、高速噴射を伴う新レオキャスト技術を考案した。この手法により実機モデルでの実験によって形質融合製造技術の検証を実施する。

2.1.2 鉄・炭素系材料における高炭素領域での半溶融鍛造

プリフォームの成形技術においては現状の連続鋳造法、金型鋳造法の改良ならびに、半凝固鍛造を検討すると電磁力等の利用による、新たなプリフォーム成形プロセスが必要である。

組成と成形性および機械的性質の関係

組織微細化の手法

多品種生産に適した連続鋳造法の開発

生産性、歩留まりに優れた金型鋳造法の開発

その他、新しいプリフォームの製造法

2.1.3 セミソリッド成形と鍛造技術の融合化への課題

溶湯から直接ピレットを製造し、加熱された状態のピレットをそのまま熱間鍛造するという鋳造・鍛造プロセスフュージョンを可能にすることにより、原単位およびCO₂排出量が大幅に削減され、画期的な形質融合製造技術になる。

2.1.4 溶湯からのアトマイズによる形質創生融合技術

双ロール法からのプロセスはストリップの製造まで対応できる有望な方法である。オスプレイ法はその適用部材の応用の応用できるフィールドの探索がもっとも重要となってる。直接噴射法は

さらに広く多くの素材に対して噴射成型法の試験およびその結果報告を行っていく必要がある。

2.2 形質融合製造技術に係る素形材単位プロセスの現状

2.2.1 素形材単位プロセスの概要

素形材産業は素材に形を与えて機械産業に供給するという、いわば素材産業と機械産業を結びつける産業である。素形材プロセスとしては、図 2.2.1 に示すように、鑄造、鍛造、金属プレス及び粉末冶金等がある。

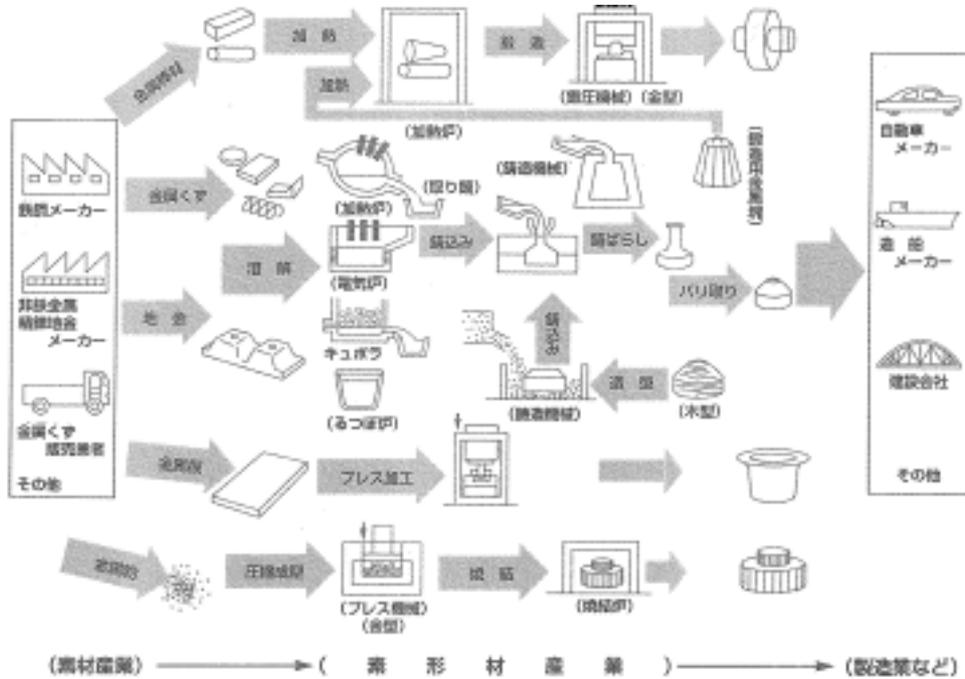


図 2.2.1 素形材産業の加工法

素形材加工法(鑄造、鍛造、金属プレス及び粉末冶金)は、液体、固体(板材、鋼塊、粉体)の状態から凝固、塑性変形、拡散結合を利用し、型を用いて製品を成形する工法で、それぞれ表 2.2.1 に示すような特徴がある。

表 2.2.1 各素形材加工法の特徴

加工法	長所	短所
鑄造	<ol style="list-style-type: none"> 1. 複雑形状製品の製造が可能 2. 巨視的不連続部がない製品が得られる 3. 対象材料に材質上の制約がない 4. 比較的安価である(5個以上の生産) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 均一肉厚の大物の製造が困難 2. 製品重量が比較的大きい 3. 安全性、信頼性の点で問題がある
塑性加工 (鍛造、金属プレス)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 機械的性質の信頼性の高い製品が得られる 2. 量産品において生産性が高い 3. 巨視的不連続部がない製品が得られる 4. 加工精度が比較的高い 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 加工設備が高価 2. 工具費が高価 3. 対象材料に材質上の制約がある 4. 加工品の形状に制約がある
粉末冶金	<ol style="list-style-type: none"> 1. 高融点材料、複合材料による部品の製造が容易 2. 生産性が高く歩留まりもよく、量産品の製造に適している 3. 加工精度が高い 4. 最終形状部品に近い製品の加工が可能で、切削加工の省略が可能 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 加工設備が高価 2. 工具費が高価 3. 原料粉末が比較的高価 4. 加工品の形状に制約がある

出所：金属加工技術の選択と事例 (S61.3 (社)日本機械学会発行)

具体的な製品を取り上げ、採用されている素形材加工法を「品質、加工性、コスト、時間(生産性・納期)及び環境」の4要素について、5点法で評価した。その事例を図2.2.2に示す。

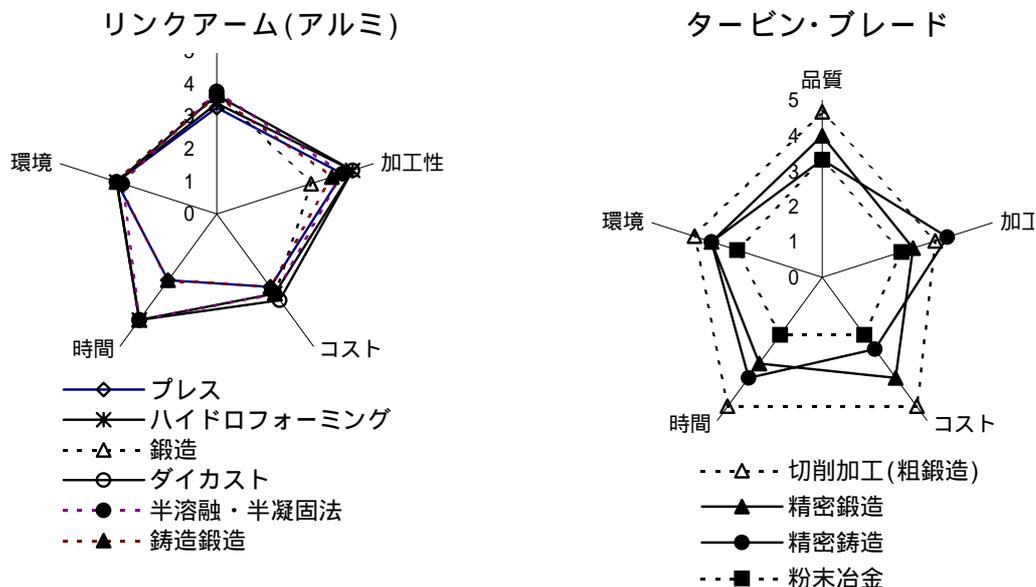


図 2.2.2 製品における製造プロセスの評価事例

出所：素形材生産プロセスの選択とプロセス技術の最新動向(素形材センター H13.3)より作成

2.2.2 素形材プロセスのエネルギー消費

素形材製造の主要プロセスである鋳造、鍛造、プレス、ダイカストおよび粉末冶金について、それぞれの単位工程における物質およびエネルギーバランスを調査し、現在注目を集めている融合加工技術の一つであるセミソリッド法によるプロセスと消費エネルギーの比較を行った。対象金属としてアルミニウム合金および鉄系合金とを選び、プロセスフローを定め、それぞれの単位工程での素材のロス率、リサイクル率ならびに単位重量当たりの必要エネルギーから単位工程で消費エネルギーを算出し、プロセス内およびプロセス間の比較を行い、以下のことを明らかにした。

- 1) アルミニウム合金および鉄系合金とも、セミソリッドプロセスは従来プロセスに較べ、エネルギー消費量が10から20%程度低い。
- 2) エネルギー消費量が多い工程は溶解であり、アルミニウムのダイカストプロセスでは1kgの製品を製造するために3.5kgもの溶解をしている。これに対し、チクソダイカストプロセスでは1.6kgの溶解で済み、プロセス全体での消費エネルギーも4.4kWh/kgから3.4kWh/kgに低減できる。

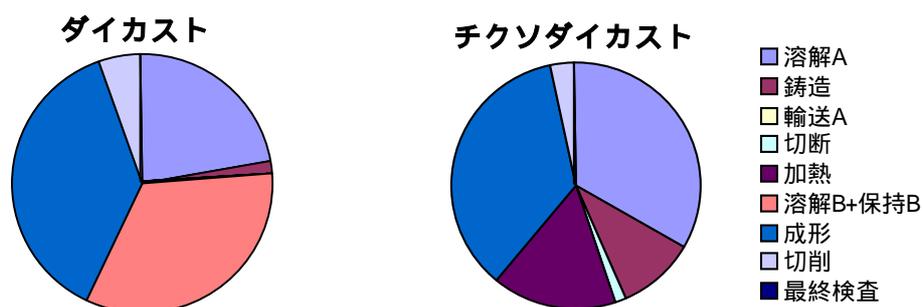


図 2.2.3 単位プロセスのエネルギー使用割合(アルミニウム)

3) 鉄系合金では、製造プロセスに占める溶解工程での寄与がより大きくなり、鑄鋼プロセスでは90%近くが溶解に要するエネルギーである。鑄鋼のチクソ鍛造プロセスや鑄鉄のチクソプロセスでは溶解工程の割合が50%前後となり、プロセス全体の消費エネルギーも6.0kWh/kgから5.0kWh/kgに下がる。

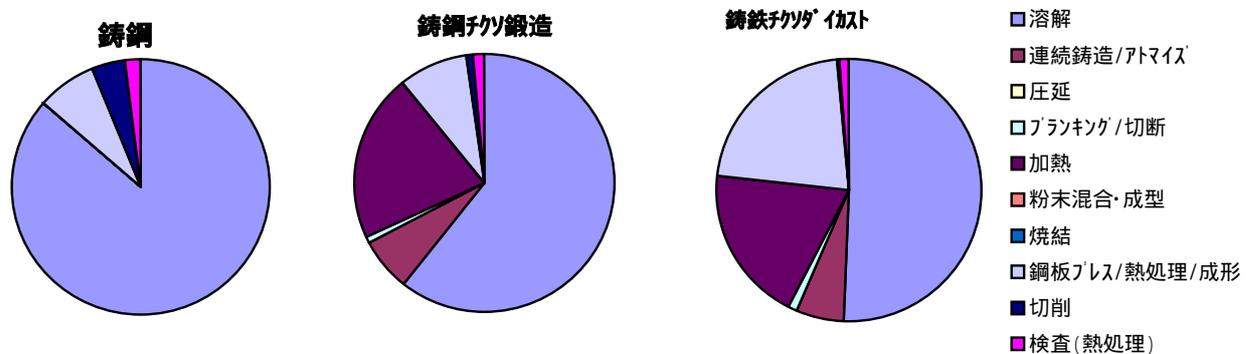


図 2.2.4 単位プロセスのエネルギー使用割合(鉄系合金)

- 4) プロセス全体の消費エネルギーを低減させるためには、溶解工程に回る材料の量を下げること、プロセス工程での歩留まりを上げることが重要である。
- 5) 鉄粉の粉末冶金プロセス、鋼板を素材としたプレス成形プロセスおよび鑄鋼プロセスの消費エネルギーはほぼ同じとなったが、鋼板のプレスプロセスでは、ブランキング工程の素材歩留まりを上げることにより、消費エネルギーを大幅に低減することが可能である。
- 6) 鉄粉による粉末冶金プロセスでは、溶解工程+アトマイズ(=鉄粉の製造工程)と焼結工程とに要するエネルギーがほぼ等しく、この二つで90%以上となっている。

2.2.3 素形材プロセスへの投入金属の製造工程

溶湯からの直接成形の可能性を検討するための資料として、素形材プロセスに投入される鉄系素材、アルミニウム素材、マグネシウム素材の製造工程及びエネルギーデータについて基礎的な情報を収集した。

エネルギーについては、(社)日本鉄鋼協会や、(社)未踏科学技術協会等の調査データのほか、産業技術総合研究所が開発し(社)産業環境管理協会が販売している JEMAI-LCA という LCA 統合評価手法ソフトに搭載されているデータがある。

図 2.2.5 に(社)日本鉄鋼協会熱経済技術部会が調査した、モデル製鉄所(一貫製鉄所)での鋼板生産プロセスについて、エンタルピーがどのように変化していくかを示したフローを示す。

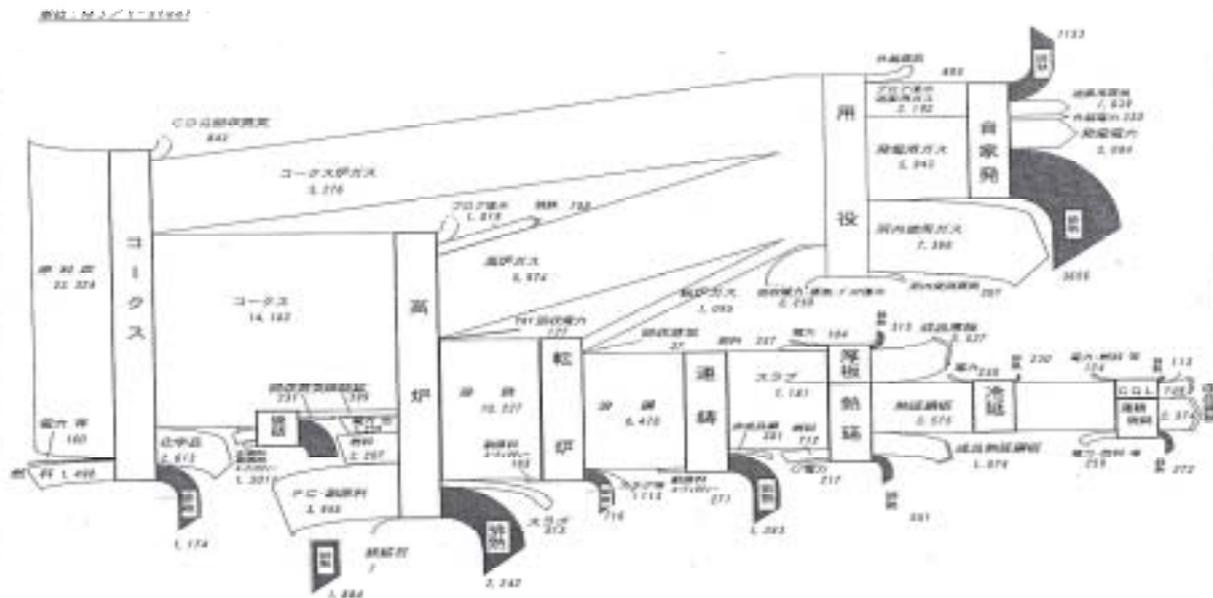


図 2.2.5 モデル製鉄所エンタルピーフロー

出所：製鉄プロセスにおけるエクセルギー評価とエネルギー有効利用の可能性研究（平成9年11月（社）日本鉄鋼協会）

2.2.4 素形材単位プロセスの最先端技術

鋳造、鍛造、金属プレス、粉末冶金の各素形材単位プロセスについて、現在これらの分野で、取り上げられている生産技術、研究、或いは注目されている技術を抽出した。

生産技術は、CAD/CAM/CAE による低コスト化、シミュレーションによる効率化、納期短縮、技術・技能のデジタル化、あるいは廃棄物の有効利用に重点が置かれている。また、自動車の軽量化に対応したアルミ、マグネ部品の拡大のための技術開発が盛んである。

研究開発では、半溶融・半凝固成形プロセス、複合化技術、金型の長寿命化と‘安く早く作る技術’に重点が置かれている。

2.3 次世代素形材プロセスの評価

2.3.1 形質制御による鉄鋼薄板製品生産プロセスの可能性の調査

素形材プロセスの単位としては鋳造、鍛造、金属プレス、粉末冶金などに分けられ、素材としては大きく鉄系、非鉄系に分けられる。これらの中から次世代素形材プロセスとして鉄鋼薄板の生産プロセスを取り上げた。

(1) モデルプラント

従来の鉄鋼薄板を作り出すプロセスは、溶解された材料から凝固・成形した後、製品まで、搬送・冷却・再加熱・圧延などを何度も繰り返す工程を経ている。このため多くのエネルギーを消費し、各工程で廃油、二酸化炭素や熱などの大量の不要生成物を発生させている。一方、溶鋼から一度に製品に近い形に凝固・成形させる技術として、ネットシェイプキャストイング等の凝固制御技術が研究され、半凝固鋳造やストリップカスターとして実用化されつつある。

また、合金元素を添加せずに製品の機械的性能を向上させる技術として、結晶粒を微細化させる研究が盛んに行われ、再熱処理せずに高強度の鉄鋼部材を生産できるようになってきた。

このような状況をふまえ、これまで個別に研究されてきた最新の技術を統合し、半凝固状態の溶鋼を双ロールストリップキャスターにて鋼板にし（創形）、大歪圧延によって結晶粒を微細化（創質）するプラントをモデルプラントとした。半凝固装置・ストリップキャスター・大歪圧延を1ラインに組み込むことによって形質制御が可能なプラントとして想定している

a．半凝固技術

半凝固状態とは金属材料が液体状態から冷却され固液共存となっている状態と考えられ、その研究は鑄造における湯流れに関連して始まったものと考えられる。フレミングらは攪拌凝固により結晶粒を微細化し、ミクロ組織を均質化する鑄造方法としてレオキャスト法を提案した。

一方、金属材料の強度は、結晶粒の微細化によって向上することが知られており、結晶粒径を1 μ mに近づけて強度や機能性等の限界性能を引き出す材料開発が期待されている。その結果、従来技術とは異なる結晶粒微細化プロセスを追及するための一つの手段としてセミソリッド（半凝固・半熔融）加工法が関心を集めている。

セミソリッド金属を製造する方法には半凝固法（レオメタル法）と半熔融法（チクソメタル法）の2つに大別される。今回策定したモデルプラントへの適用を考えると、半凝固法の連続製造法が参考になる。その様な方法として以下の方法について調査した。

1) レオテックで行ったレオメタル連続製造装置の例として機械攪拌法・電磁攪拌法・せん断冷却ロール法

2) よりシンプルな装置での半凝固鑄造技術による傾斜冷却板法

3) 新たに考案した、円筒状流路を所定角度に傾斜させた状態で所定速度で回転させる方法

4) 半凝固状態の金属を製造する装置と下流装置を結合したプロセス

5) せん断冷却ロール法で製造したレオメタルを直接圧延機に供給して、一気に薄板に圧延する方法

6) 溶解室で熔融された合金を攪拌室に導入し、機械的に攪拌した後、固液共存状態で押し出しノズルから押し出し、微細結晶粒を有する状態で、急凝固させながらロールにより連続的な板状に成形する方法

b．ストリップキャスト技術

ストリップキャストは1856年にヘンリー・ベッセマー卿が双ロールストリップキャスターを発表して以来、溶鋼を直接薄板に製造する夢の技術である。1980年代後半になりニアネットシェイプ素材を鑄造できる革新的な薄板鑄造技術として世界的に活発に開発が行われてきた。ストリップキャスターには双ロール法・異径ロール法・単ロール法・単ベルト法等の形式がある。ストリップキャストとして最も開発されている双ロール法は熔融金属はロール間に注入され、ロール表面で冷却されることにより凝固し、ロールニップで圧着されストリップとして製造するものである。ストリップキャストでは冷却速度が1000倍程度大きく、板厚は約1/100となり、熱間圧延工程の大幅な簡略化が可能となる。また、スラブ連続鑄に比べストリップキャスターを利用した場合には、ライン全長が約1/10に短縮される。近年、双ロールストリップキャスターの実機化がなされつつあり、各社実機規模のプラントで試験を行い、一部では実機操業を行っている。今回策定したモデルプラントはこれらのプラント

に半凝固装置や大歪圧延・冷間圧延等を結合させたものである。

c. 大歪圧延技術

1960年代後半から急速に発達した厚板製造工程における制御圧延は、さらに1970年代から加速冷却・制御冷却と呼ばれる冷却技術が開発され、制御圧延後のオーステナイトからフェライトへの変態温度領域を急冷し、変態組織を制御圧延以上に細分化して、より高いレベルの高強度の達成が可能となってきた。このプロセスをTMCP (Thermo-Mechanical Control Process) と呼び、オンライン圧延による新材質創製および形状形成の技術となっている。一方、半凝固技術においても述べたように合金元素の添加によらず鉄鋼材料の強度を高めるためには、結晶粒の微細化が最も優れた手段である。このような観点から鉄系スーパーメタルプロジェクトや超鉄鋼プロジェクトが実施され、それぞれ成果が報告されている。鉄系スーパーメタルプロジェクトでは「均一な複相組織鋼化によって、結晶粒径が1 μ m程度以下で、1mm以上の厚さをもつ微細組織鋼の創製技術を確立する」ことを目標とし、そのための要素技術の1つとして大歪熱間加工による複相組織鋼の超微細化研究があげられている。

(2) ターゲット製品

鉄鋼薄板製品は主に熱延鋼板、冷延鋼板、メッキ鋼板に分けられる。モデルプラントでは後工程としての表面処理(メッキ)ラインを含んでいないのでメッキ鋼板はターゲットとならない。上述のストリップキャスターのプラントでは熱間圧延設備の省略を目指しており、この設備単体でのターゲット製品は熱延鋼板と同程度となる。今回想定したモデルプラントでは大歪b圧延による結晶粒微細化もおこない、冷間圧延も含んでいるので、さらに高付加価値の冷延鋼板をターゲット製品とした。

(3) プロセス評価

策定したモデルプラントの評価として、設備コスト・生産コスト・環境負荷を検討した。設備コストはプラント設置時にかかる費用に着目しており、生産開始時の初期投資額に相当する。この値はプラント構成する各機器の価格から求めた。生産コストはプラント運転時にかかる費用に着目しており、鉄鋼薄板1tonの生産に要する消耗品・エネルギーの費用から求めた。環境負荷はプラント運転時に消費するエネルギー量を二酸化炭素排出量に換算して求めた。

表 2.3-4 にそれぞれの算出結果を示す。

表 2.3-4 形質制御による鉄鋼薄板製品生産プロセス評価結果

設備コスト		生産コスト		環境負荷		
構成機器	コスト (億円)	要因	コスト (千円/ton)	構成機器	エネルギー (MJ/ton)	二酸化炭素排出量 (kg/ton)
連続半凝固装置	30	消耗品	4.0	連続半凝固装置	33	7
ストリップキャスター	30	エネルギー	1.2	ストリップキャスター	77	16
大歪圧延機	80			大歪圧延機	111	23
冷間圧延機	80			冷間圧延機	158	32
合計	220	合計	25.2	合計	379	78

2.3.2 現状の鉄鋼薄板製品生産プロセスとの比較調査

2.3.1 項で策定したモデルプラントと比較するために、同じターゲット製品を製造している現状のプラントを想定し、プロセスの評価を同様に行った。

(1) モデルプラント

2.3.1 項でターゲット製品を冷延鋼板としたので、溶鋼から冷延鋼板を生産するまでの現状の設備をモデルプラントとした。各構成装置は現状国内の一般的な鋼板生産設備で、連続铸造機、加熱炉・熱間圧延ライン、酸洗・冷間圧延・焼鈍・(調質圧延)ラインとした。

(2) プロセス評価

モデルプラントに対して、設備コスト・生産コスト・環境負荷を検討した。算出方法も同様である。製鉄プロセスにおけるエネルギー使用量に関しては省エネ対策前のモデル製鉄所で求められている数値を用い、連続铸造機以降のエネルギー使用量のうち、連続焼鈍を経て製造される製品割合相当のエネルギー使用量とした。

表 2.3-5 現状の鉄鋼薄板製品生産プロセス評価結果

設備コスト		生産コスト		環境負荷		
構成機器	コスト (億円)	要因	コスト (千円/ton)	構成機器	エネルギー (MJ/ton)	二酸化炭素排出量 (kg/ton)
連続铸造機	50	消耗品	4.3	連続铸造機	92	19
加熱炉	80	エネルギー	5.3	加熱炉・熱間圧延ライン	997	205
熱間圧延ライン	150			酸洗・冷間圧延ライン	175	36
酸洗・焼鈍ライン	100			焼鈍ライン	478	98
冷間圧延機	50					
合計	430	合計	9.6	合計	1742	358

2.3.3 形質制御による鉄鋼薄板製品生産プロセスの評価と課題

次世代素形材プロセスには環境適合性が求められることは間違いない。一方、環境適合性が高くても他のプロセスに比べて経済的に不利であれば、その普及はままならない。本項ではこのような観点から鉄鋼薄板製品生産プロセスの評価と課題について検討した。

(1) 形質制御による鉄鋼薄板製品生産プロセスの評価

今回策定したモデルプラントで比較した結果、形質制御による鉄鋼薄板製品生産プロセスの優位性は以下のように考えられる。

設備コストについては現状プロセスの 430 億円に対し、形質制御プロセスでは 220 億円であるので、現在の約 50% に削減されると想定される。生産コストについては現状プロセスの 7.4 千円/ton に対し、形質制御プロセスでは 5.2 千円/ton であるので、現在より約 30% 削減されると想定される。環境負荷については鉄鋼薄板 1 ton 当たりの二酸化炭素排出量で現状プロ

セスの 358 kg に対し、形質制御プロセスでは 78 kg に削減される。年間の粗鋼生産量 1 億 ton に形質制御プロセスが適用されたと考え、28 百万 ton の二酸化炭素排出量が削減され、2.4%削減できると想定される。

(2) 形質制御による鉄鋼薄板製品生産プロセスの課題

今回策定したモデルプラントを実用化するために想定される課題と解決のための方策を a. 連続半凝固装置 b. 双ロールストリップキャスター c. 大歪圧延 d. ライン全体 について検討した。

a. 連続半凝固装置

半凝固装置には様々な手法が提案されているが、高融点の鉄鋼を対象とした装置で実機化されたものはなく、さらにラインとしての連続運転を前提とした装置は開発されていない。そこで、これらに対応した研究開発をおこなう必要がある。

b. 双ロールストリップキャスター

双ロールストリップキャスターは実機化がなされつつある。しかし、既存の双ロールストリップキャスターと今回策定したモデルプラントでは、供給される溶鋼が半凝固状態となっている点が異なる。そのため、双ロールストリップキャスターで開発事項であった点が本プロセスでも課題となる可能性がある。

c. 大歪圧延

大歪圧延の組織微細化への効果は様々な検討がなされているが、実機ライン化を念頭に置いた大歪圧延方法の選定や b、安定操業のための運転条件に関する検討はなされていない。そこで、これらに対応した研究開発をおこなう必要がある。

d. ライン全体

以上の検討で形質制御による鉄鋼薄板製品生産プロセスモデルプラントの各構成要素の課題は解決できるが、プラントとしてライン化する場合にはラインとしての課題もあると考えられる。

3. 調査研究の今後の課題及び展開

3.1 本調査研究の範囲と成果

本調査研究においては、今後の形質融合製造技術の核となることが予想される要素加工技術やプロセスとして以下のものを検討し、その可能性や展望を示した。

- (1) 高速攪拌射出を伴う新レオキャスト法
- (2) NRC(ニューレオキャスト)法とその応用プロセス
- (3) 高炭素鉄系材料の半溶融鍛造プロセス
- (4) セミソリッド成形と熱間鍛造の融合プロセス
- (5) 溶湯からのアトマイズによる形質融合製造技術

3.2 今後の研究開発課題

調査研究を通して明らかになった今後の開発や整備が望まれる主要技術課題を、共通基盤課題と実加工対応課題とに分けて列挙すると、以下の如くなる。

[] 共通基盤課題

- (1) 溶湯・半凝固金属の高精度秤量技術、保持技術、ハンドリング技術
- (2) 半溶融・半凝固金属の固相率測定技術、固相率制御技術
- (3) 半溶融・半凝固金属の変形抵抗・粘度等特性値の測定技術、予測技術
- (4) 高温型材料技術、高温潤滑技術
- (5) 溶湯・半凝固材・完凝固材等共存下の変形・流動のシミュレーション技術
- (6) 製品内部の組織および機械的特性等予測技術
- (7) 局部急速加熱・冷却技術
- (8) 半溶融・半凝固金属への高圧付加技術
- (9) 半溶解・半凝固金属の高速大ひずみ加工技術

[] 実加工対応課題

本調査研究で採り上げた各個技術やプロセスを実現していくためには、幾つかの実加工対応基盤技術が必要である。それらの内の主なものを列挙すると以下のようになる。

- (1) 溶湯・半凝固金属の高圧プレス加工技術：最大加圧力 = 300MPa、最高温度 1300
- (2) 溶湯・半凝固金属移送用ポンピングシステム技術：
送圧力最大 3.0 MPa、送量最大 200 l / min、最高温度 1300
- (3) 高温型材料技術：耐圧能力 300 MPa / 1300
- (4) 高温プレス機械：使用雰囲気温度 600 以上、最大荷重 800ton
- (5) 超高温高圧ガスアトマイズ機：ガス温度 1000 、ガス圧力 30MPa
- (6) フリーモールドプリフォーム鑄造機械：
溶量 30 kg / チャージ、加振ストローク 50 mm、振動数 Max 300 Hrз、

3.3 溶湯・半凝固金属の高圧プレス加工技術

形質融合製造技術の開発・整備には、溶湯・半凝固金属に高圧を付加することができるプレス技術並びにプレス機械が必須となる。また、溶湯や半凝固金属に加圧する場合に最も問題に

なるのは、型材料とシーリング技術である。したがって、ここで云う高温高压付加プレス技術とは、この型材料技術とシーリング技術が中心となり、それにプレス機械技術や制御技術などが加わる。

3.4 湯・半凝固金属移送用ポンピングシステム技術

溶湯・半凝固金属の加工には、これらの被加工材を所定の保持炉から加工機へ、また加工機から加工機へとすばやく移送するシステム技術が不可欠である。圧送ポンプと管路を用いて溶湯あるいは半凝固金属を移送することができれば、密閉した管路系を通して、被加工材を酸化から守りつつ、清浄な状態で加工機へと送り込むことが可能となり、酸化物の巻き込みによる内部欠陥の発生の心配もなく、品質の安定した製品の製造ができる。

3.5 高温型材料技術

高温に耐える型材料は全ての製造・加工技術の要である。耐熱強度に優れる型材料は過去一貫して求められてきたが、未だ十分な結果は得られていない。形質融合製造技術が、鉄系材料までをも対象とするならば、約 1300℃ で 300MPa 程度の圧力に耐える型材料が求められる。この問題への対応策としては、

- (1) 耐高温強度に優れた材料そのものの開発を目指す、
 - (2) 現行の型材料をも含めて、高温に耐え得る使用技術を開発する、
 - (3) 高温に耐え得る型表面コーティング技術の開発を目指す、
- などが考えられる。

3.6 フリーモールドプリフォーム鑄造技術

特定の形状・寸法を持つ鑄型あるいはモールドを使用せず、半球状容器や半楕円体状容器、その他の形状を有する金型を用いて、溶湯金属を球体状あるいは楕円体状の半凝固体又は完凝固体プリフォームに創形し、それに続く加工機へ供給していくための技術である。この技術の特徴は以下の通りである。

- (1) 用いる金型は、単純形状を有しており、兼用性が高く、投入する溶湯の量に応じて異なる寸法並びに重量のプリフォームを創形できる。
- (2) 加振鑄造技術を併用し、金型に適切な振動を加えつつ冷却することにより、型内での凝固制御を行い、創形するプリフォームの凝固率(固相率)および形状を一定範囲内で変えることが出来る。
- (3) 金型の形状そのものは自由に変更、選択でき、目的や対象とする溶湯の種類に応じて最も適したものを採用できる。

3.7 超高温・高压ガスアトマイズ技術

ガスアトマイズを行う際に、噴霧された金属溶湯の粒子の大きさをできる限り細かくする試みは、これまでも広く行われてきているが、これを更に追求するために、以下の特徴や機能を有するアトマイズ技術を開発する。

- (1) ガス温度最高 1000℃、ガス圧力最高 30MPa を実現し、高压噴霧による創製粉粒体の微細化を実現する。

- (2) 高温ガスを用いることにより、創製粉粒体の凝固状態を制御可能とし、必要に応じて半凝固粉粒体を製造可能とする。
- (3) 創製された粉粒体を移送し、所要のモールド又は型内へ直接送り込む搬送システム技術を装備する。

3.8 高温プレス機械技術

形質融合製造技術では、半溶融・半凝固金属の創形・創質加工を行うことが大きな意味を持つことになるが、加工機（主としてプレス機）内部において、被加工材の半溶融・半凝固状態を安定的に維持することは、必ずしも容易ではない。そこで、加工の場全体を高温に維持し、被加工材の温度低下を防止することが必要となる場合が多い。

ここで云う高温プレス機械は、プレス機械の加工機能部全体がかかる高温状態に保たれた状態で有効な加工を行い得るものであり、次のような特徴を持つ。

- (1) 被加工材に応じて必要な高温加工の場を任意に作り出すことができる。またその温度場を安定して維持できる。
- (2) 熱により生じる機械誤差その他の影響を補償できる機能を有している。
- (3) 600 以上の高温で高速・高負荷の加工を継続することができる。
- (4) 多軸・複動・数値制御機能を有し、多元的な加工をシーケンシャルに実行することができる。
- (5) 高温の加工部とそれ以外の機械・機構部分とが熱的に遮断されており、高い熱効率を維持することができる。

3.9 総合技術開発課題「 極大資源効率金属品製造プロセスマスターの開発 」の提案
金属製品の製造プロセスの理想的なあり方を具体的に示す「製造プロセスマスター」の開発を図り改革を進めていくことが重要と考えられる。「プロセスマスター」が示す中核技術の応用を拡大し、そこに示される手法・手段を各個技術の中に組み込んでいくことが、製造技術体系の革新を促進していく上で肝要であり有効である。この「製造プロセスマスター」は本質的に以下の特質を有するものでなければならない。

- (1) 普遍性のあるコンセプトに基づいている。
- (2) 汎用性のある基盤技術から構成されている。
- (3) プロセスの構造・機能が柔軟である。
- (4) 省資源性・環境調和性に優れている。

3.10 「製造プロセスマスター」とは

「製造プロセスマスター」とは、目的とする製品（部材・部品を含む）を作り出すために必要な基盤要素技術および基盤加工工程の組合わせによりなる製造プロセスであり、次の要件を満足する。

- (1) 高度な創形能力・創質能力を有する基盤要素技術により構成されている。
- (2) 必要最低限度の工程数よりなり、極度に簡素化された工程構成となっている。
- (3) 考えられ得る範囲で最も高い合理性・生産性を有している。
- (4) 考えられ得る範囲で最も高いエネルギー・資源の利用効率を有している。
- (5) 考えられ得る範囲で最も小型・軽量・簡素であり且つ最も機能性・操作性に優れた加工機械群・周辺設備群によって構成されている。
- (6) 最も低いコストで所要の製品を作ることができる。
- (7) 採用されている基盤要素技術は汎用性が高く、対象製品や目的が変化しても、広い範囲の技術的要求に応えることができる。
- (8) プロセスの構成が柔軟であり、多様な目的に対してプロセスの変更ができる。

以上の機能・特性より、「製造プロセスマスター」とは、所要の製品の形・質（構造・機能）を実現し達成できる最も合理性・生産性に優れ、最もコスト競争力のある究極の製造プロセスであり、対象とする製品を目指すあらゆる製造プロセスの源型であると考えられる。

・禁無断転載・

14・R・13

産業競争力向上のための金属材料の形質
融合製造技術体系化に関する調査研究報告書
・ 要 旨 ・

平成15年3月

作 成 財団法人 機械システム振興協会
東京都港区三田一丁目4番28号
TEL 03(3454)1311

委託先 財団法人 製造科学技術センター
東京都港区愛宕一丁目2番2号
TEL 03(5472)2561