

平成22年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「精密鑄造プロセス高度化のための
新たな凝固組織制御技術の開発」

研究開発成果等報告書概要版

平成23年3月

委託者 中部経済産業局

委託先 財団法人富山県新世紀産業機構

目 次

第1章 研究開発の概要

- 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標
- 1-2 研究体制(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)
- 1-3 成果概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 人工関節鋳造部品の鋳造時制御冷却法による凝固組織制御技術の確立

- 2-1 研究目的及び目標
- 2-2 実験方法
- 2-3 研究成果

第3章 人工関節鍛造部品用荒地材の鋳造凝固組織制御技術の開発

- 3-1 研究目的及び目標
- 3-2 実験方法
- 3-3 研究成果

第4章 仕上げ機械加工の高速化・高精度化のための表面加工技術の確立

- 4-1 研究目的及び目標
- 4-2 CCM 合金の切削加工性評価についての検討
- 4-3 電子ビーム・レーザービームによる表面溶融加工技術の開発
- 4-4 摩擦摩耗試験評価

第5章 人工関節部品製造の低コスト化に対応するための材料リサイクルシステムの構築

- 5-1 研究目的及び目標
- 5-2 実験方法
- 5-3 研究成果

第6章 全体総括

- 6-1 成果の総括
- 6-2 今後の取組み

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

人工関節製品市場では、海外製品の占有率が高く、国内川下製造業者は、技術及び価格(コスト)面において厳しい国際競争にさらされている状況にある。

金属製人工関節部品にはチタン合金製、ステンレス鋼製およびコバルトクロムモリブデン合金(以下 CCM 合金という)製などがある。チタン合金及びステンレス鋼部品は、過去より国内メーカーの使用実績も多く、また、多くの製造ノウハウの蓄積もあり、競争力は比較的強い製品である。

一方、CCM 合金は、これら材料に比べ強度、耐摩耗性に優れていることから、使用実績が増加する傾向にある。また、最近の医療現場では、人工関節適用者の低年齢化に伴い、様々な活動に対応可能な人工関節の開発が望まれている。このためには、国の承認を必要とする合金組成の変更をせず、CCM 合金の剛性や靱性などの機械的性能を向上することにより、製品の薄肉化(=材料コスト低減)や機能性向上を可能にするようなデザイン設計の自由度を高めることが課題の一つとなっている。

一般に膝、大腿骨等の人工関節(鋳造部品、鍛造部品)は、いくつかの部品から構成されており、CCM 合金製の場合、製造方法は、部品形状、要求性能、コスト等に応じて鋳造法や鍛造法が採用されている。これら製造技術については海外からの技術導入により今日に至っており、この分野での技術的蓄積が少ないがために、医療現場からの技術的課題に対して、技術面での対応の遅れが指摘されることもある。例えば、関節部品の中で、摺動する部位には、CCM 合金の嵌合相手としてプラスチック材が用いられるが、人工関節の使用例の増加とともに CCM 合金に内在している炭化物がプラスチック部品を削ってはめあいが甘くなり、脱臼を起こし易くなったり、削られたプラスチックをマクロファージが貪食し炎症を起こしたりする症例が報告されている。その対策として、海外ではプラスチック嵌合部品のないメタル-メタルインジェクション人工関節の研究開発がなされており、一部製品化もされているが、国内では、研究例が少なく、実用化には至っていない。またメタル同士の接触の場合、摺動特性や摩擦摩耗特性が従来と異なるため、金属凝着や摩耗などの新たな問題も指摘される。このため、JIS 規格範囲内での CCM 合金の材料設計の変更と共に、素材強度、靱性などの機械的性質の向上や嵌合部表面の摺動性、耐摩耗性の改善を図るための鋳造技術の開発や鋳造後工程の熱処理、鍛造技術などの技術開発が求められている。

また、従来の人工関節部品の製造工程は、部品に応じて主に①鋳造成形後、HIP 処理、機械加工仕上げ ②鍛造用荒地材の鋳造成形後、熱処理、鍛造成形(精密型鍛造)、機械加工仕上げの二通りに分かれる。HIP 処理は、高温、高圧負荷環境でピンホールなどの欠陥を除去する工程で、時間のかかるバッチ式処理工程であり、製造コストの約 40%を占める。また、鍛造成形では、荒地材の品質が熱処理と共に後の鍛造工程での成形性、工程数などに影響を与える。今後、高齢化が進み、医療分野では、人工関節等の需要増が予測され、川下製造業者には製品納期の短縮化の要求が強まると予想される。

本研究は、CCM 合金製人工関節部品の高強度化、高機能化、低コスト化及び短納期化を図るため、電磁浮遊溶解炉(インダクションスカル炉)ならびに不活性ガスを利用した熱交換方式の制御冷却装置の使用により、高品位溶解の実現及び鑄造工程における凝固・冷却速度の可変による凝固組織制御技術を確立する。本技術により、現行鑄放し品の引張強度、伸び等の機械的性質の向上、鑄造及び鍛造による製造コストの低減を目指す。

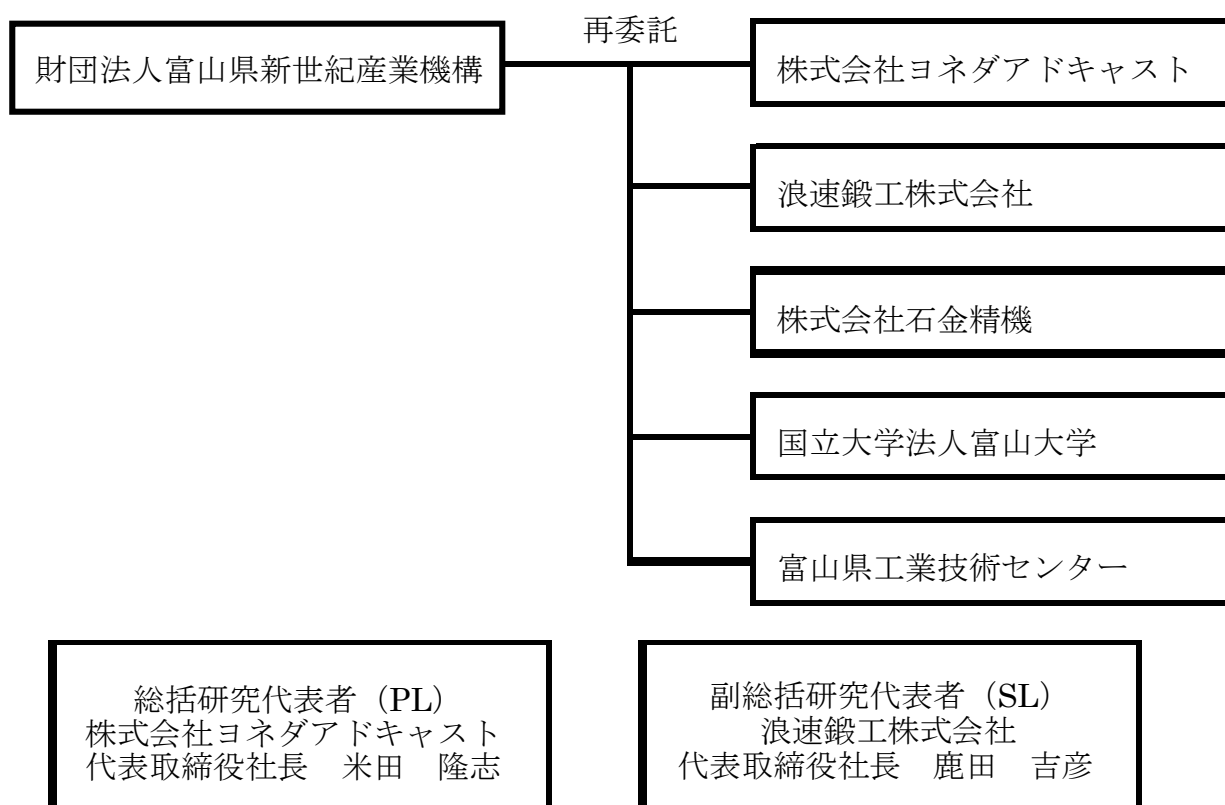
また、人工関節のメタルーメタル嵌合を実現するため、高精度切削加工技術及び表面改質技術の開発を行い、現状関節品(メタループラスチック嵌合)と同等以上の摺動性・耐摩耗性を確保する。

さらに、人工関節部品製造の低コスト化に対応するための CCM 合金のリサイクルシステムを構築し、各製造工程での端材等の回収材料の再利用率向上を目指す。

1-2 研究体制(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)

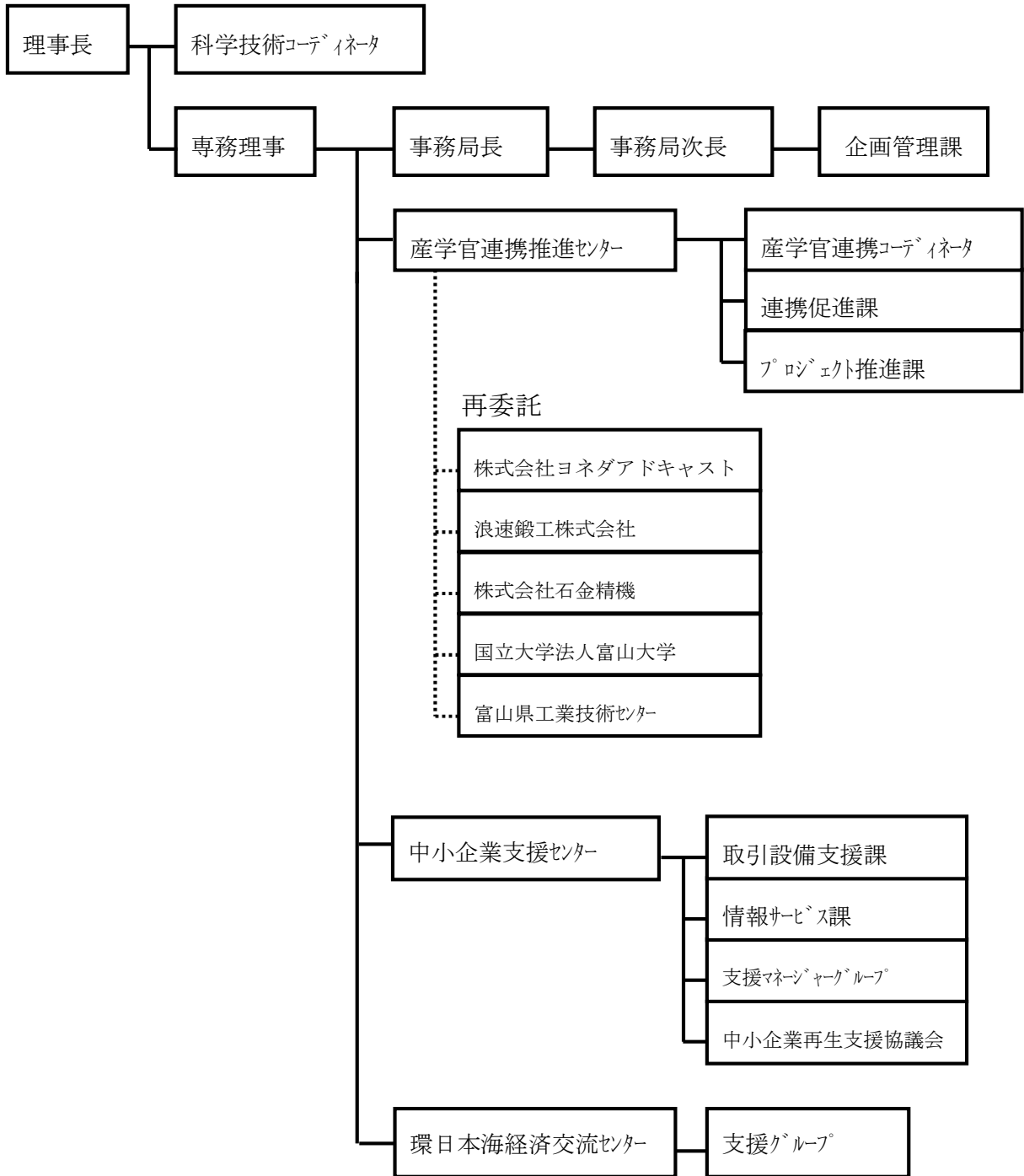
1-2-1 研究組織・管理体制

研究組織

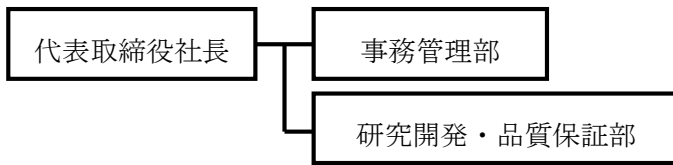


管理体制

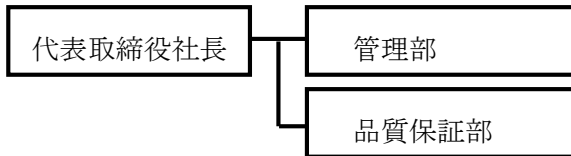
【富山県新世紀産業機構】



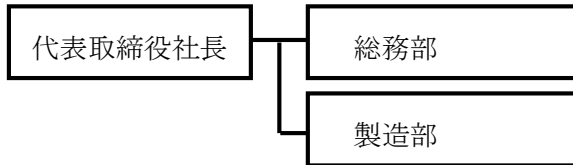
【株式会社ヨネダアドキャスト】



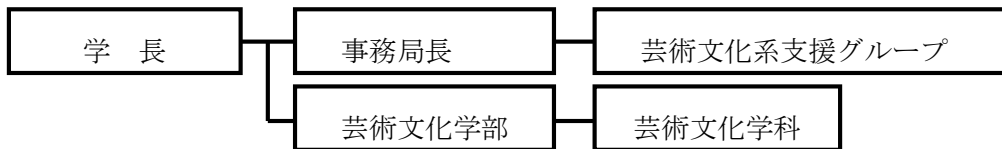
【浪速鍛工株式会社】



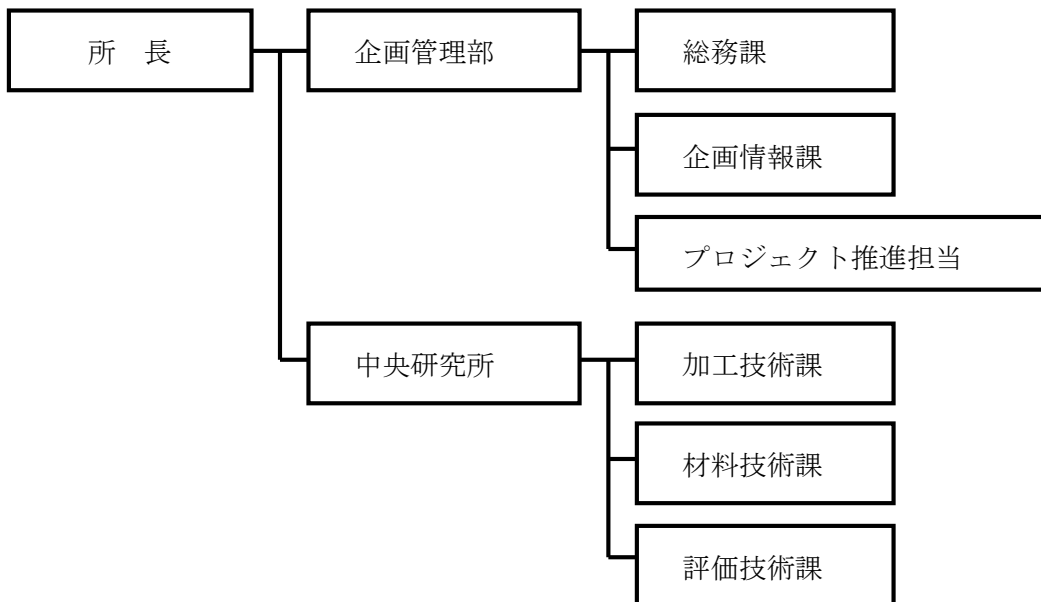
【株式会社石金精機】



【国立大学法人富山大学】



【富山県工業技術センター】



1-2-2 研究者氏名

株式会社ヨネダアドキャスト

氏名	所属・役職
米田隆志	代表取締役社長、(兼)研究開発・品質保証部長
吉沢輝光	研究開発・品質保証部
大久保利之	研究開発・品質保証部

浪速鍛工株式会社

氏名	所属・役職
鹿田吉彦	代表取締役社長
西村元一	取締役品質保証部長

株式会社石金精機

氏名	所属・役職
清水克洋	代表取締役社長
加藤義一	専務取締役

国立大学法人富山大学

氏名	所属・役職
長柄毅一	芸術文化学部 准教授

富山県工業技術センター

氏名	所属・役職
富田正吾	中央研究所 加工技術課長
林千歳	中央研究所 評価技術課 副主幹研究員
山岸英樹	企画管理部 プロジェクト推進担当 主任研究員
川堰宣隆	企画管理部 プロジェクト推進担当 主任研究員
柿内茂樹	中央研究所 加工技術課 研究員

1-2-3 協力者

日本メディカルマテリアル株式会社 技術フェロー(研究技術調査室 室長) 山脇 昇
 国立大学法人東北大学 金属材料研究所 教授 千葉 晶彦
 国立大学法人東北大学 大学院工学研究科 教授 成島 尚之
 国立大学法人東京医科歯科大学 生体材料工学研究所 教授 塙 隆夫

1-3 成果概要

(1) 人工関節鑄造部品の鑄造時制御冷却法による凝固組織制御技術の確立

平成21年度は、凝固組織に及ぼす材料組成、冷却速度、冷却用不活性ガスなどの凝固パラメーターの影響を検討することで、鑄放し品で F75 組成の機械的性質を満たす凝固時間範囲があることを見出した。平成22年度は引き続き電磁浮遊溶解炉及び制御冷却装置を使用し、平成21年度で得られた知見をもとに推定される操業条件にて、実製品形状の 28Φ 骨頭モデルを冷却速度制御しながら鑄造した。その結果、鑄造後の HIP 処理や熱処理を施さなくても鑄放しで欠陥のない F75 規格を満足できる製品が得られることが確かめられた。HIP 処理、熱処理の必要なヘッドアウターのような製品では、冷却速度制御することで、最大 47% のコスト低減が見込まれることが分かった。

(2) 人工関節鍛造部品用荒地材の鑄造凝固組織制御技術の開発

ニアネットシェイプ鍛造し易く、かつ強度劣化のない鍛造用荒地材を鑄造にて作製するため、電磁浮遊溶解炉及び制御冷却装置を用いて試作した鍛造用荒地材の凝固組織及び機械的性能に及ぼす鑄造方法及び制御冷却方法について検討を行い、最適な組織制御条件を確立した。

また、上記の鑄造法を用いた棒状の鑄造試験材(鍛造用荒地材)の鍛造成形性について検証し、機械的性能を得るための鍛造温度条件を模索した。鍛造実験には精密な温度管理が可能なエレマ加熱装置を使用し、温度パターンを選択した。また型打前工程に予備鍛錬を追加、鑄造材に熱処理を追加して要求される機械的性能を得る鍛造方案を確立した。

また、素材費を大幅に削減するネット化については実製品形状の関節部品を製作し、評価を行った。荒地材の形状を種々検討することにより、鍛造品における製造コストをトータルで最大 32.5% 削減することが可能となった。

(3) 仕上げ機械加工の高速化・高精度化のための表面加工技術の確立

平成21年度研究において加工条件、工具種および研磨工程を最適化することで、表面あらさ Ra0.05 とするコストについては、当初選定した条件に比べ、平板試験片で約 50% 程度のコストダウンが可能となった。平成22年度はさらなるコスト低減を目指し、実製品形状の関節部品の試作と評価を行うことで、CCM 合金の加工条件、工具種および研磨工程について再検討した。その結果、仕上げ加工に CBN 電着工具を用いることにより、最終表面粗さ Ra0.05 とするコストを平成 21 年度に試算した金額よりも 37% 削減できた。また鍛造品においても平板試験片における切削加工性の評価を行い、鍛造品においても鑄造品と同等の切削加工性であることが確認できた。

CCM 合金の嵌合部表面の摺動性及び耐摩耗性の改善を図るため、電子ビーム(以下 EB) レーザビームを用いた表面溶融による表面局部領域の組織制御技術の開発を行った。EB の

照射エネルギー密度の低下による溶融池内の対流を小さくするために、焦点のはずし量、ビーム電流を変化させた実験を、平板状試験材で行った結果、平板状試験材に対しては焦点はずし量+5 mm、ビーム電流 1 mA の条件で EB を照射した場合で $Ra=0.05 \mu m$ となり、最終目標あらさを達成することが出来、また、その場合の溶け込み深さは $20 \mu m$ であった。また実製品モデルとして骨頭モデルを取り上げ、同様の実験を行った結果、ドットピッチ 0.02 mm、ビーム電流 1 mA、回転速度 97.8 度/min の条件で EB を照射した場合 $Ra=0.11 \mu m$ から $Ra=0.15 \mu m$ となり、電子ビーム単独のプロセスだけでは、目標あらさを達成することができなかったが、通常の手研磨作業の省力化には効果があることが示された。

レーザビームによる表面溶融加工では、加工効率を向上させるために多重反射ミラーを用いることにより 8mm 角の領域を加工できることを示し、その加工深さは、 $200\sim 250 \mu m$ と電子ビーム加工に比べ大幅に増加させることが可能となった。しかし、レーザプロセスでは、表面あらさの目標を達成することができなかった。レーザプロセスによる改質層の硬さは、EB プロセスの場合とほとんど変化なくプロセスによる依存性は認められなかった。

CCM 合金に分散する大きな炭化物は、電子ビーム照射によって、一旦マトリックス中に強制固溶され、凝固時にネットワーク状に析出物を生成する。ビーム電流が大きくなると、それらは微細な粒状の炭化物となる。電子ビーム照射によって鋳造合金の平均硬さは 410 HV から $480\sim 530 HV$ へ増加した。乾式摩擦摩耗試験では耐摩耗性はかえって低下したが、疑似液体中での摩擦摩耗試験では、10 km の摩耗試験後の摩耗量はほぼ同等であり、摩耗痕の幅は鋳造合金よりも狭くなることが確認できた。

(4) 人工関節部品製造の低コスト化に対応するための材料リサイクルシステムの構築

平成21年度の研究課題(加工残材の回収方法、固化方法、洗浄および再溶解方法)について引き続き実験を行うことにより、最適なりサイクル手法を決定した。そしてこれまでの研究において、CCM 合金の溶解、鋳造、鍛造及び機械加工で発生する残材、バリ、切削屑など廃材として取り扱われている CCM 合金の完全リサイクルを達成するため、廃材の形態調査及び成分分析を実施することにより加工工程での汚染状況を調査した。その結果、鍛造加工で発生するバリは、表面の酸化や離型剤の炭化などにより黒褐色の皮膜が形成されているが、皮膜直下の組成は、素材成分とほとんど変化がなくリサイクルがし易いことが示された。また、切削加工において切削油等を除去することができれば切粉の成分はほぼ素材と同様であることから、簡単な洗浄でリサイクル可能であることが示唆された。

これらを踏まえ、本年度では、加工残材の洗浄および再溶解方法について検討を行ったところ、切粉に付着した切削油の除去は、リサイクル材の化学組成および作業性や熔製時の熔湯の状態等から、 $500^{\circ}C$ で熱分解する方法が最適であることがわかった。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

(1) 事業管理機関

法人名:財団法人富山県新世紀産業機構(代表者 理事長 石井隆一)

住 所:〒930-0866富山県富山市高田529番地
連絡担当者名、所属役職名:藤城 敏史 産学官連携推進センター部長
TEL:076-444-5636 FAX:076-444-5630
e-mail:fjk@tonio.or.jp

(2) 総括研究代表者

氏 名:米田隆志
組織名:株式会社ヨネダアドキャスト
所属役職名:代表取締役社長
TEL:0766-22-8184 FAX:0766-22-8265
e-mail:takashi@yac-ic.com

(3) 副総括研究代表者

氏 名:鹿田吉彦
組織名:浪速鍛工株式会社
所属役職名:代表取締役社長
TEL:06-6981-7285 FAX:06-6974-7122
e-mail:mail_info@namitan.co.jp

(4) 研究実施者

機関名	代表者役職氏名	連絡先
株式会社 ヨネダアドキャスト	代表取締役社長 米田隆志	〒933-0951 富山県高岡市長慶寺 910 TEL: 0766-22-8184 FAX: 0766-22-8265 e-mail:takashi@yac-ic.com
浪速鍛工株式会社	代表取締役社長 鹿田吉彦	〒537-0001 大阪府大阪市東成区深江北 2-12-20 TEL: 06-6981-7285 FAX : 06-6974-7122 e-mail: mail_info@namitan.co.jp
株式会社 石金精機	代表取締役 清水克洋	〒939-8032 富山県富山市流杉 255 TEL: 076-423-8317 FAX : 076-425-0242 e-mail:k-shimizu@ishigane-fas.co.jp
国立大学法人 富山大学	学長 西頭徳三	〒930-8555 富山県富山市五福 3190 〒933-8588 富山県高岡市二上町 180 TEL: 0766-25-9160 FAX : 0766-25-9215 e-mail:tnagae@tad.u-toyama.ac.jp
富山県工業技術 センター	所長 榎本祐嗣	〒933-0981 富山県高岡市二上町 150 TEL: 0766-21-2121 FAX : 0766-21-2402 e-mail:tomida@itc.pref.toyama.jp

第2章 人工関節鑄造部品の鑄造時制御冷却法による凝固組織制御技術の確立

2-1 研究目的及び目標

平成21年度までの研究開発で、凝固組織に及ぼす材料組成、冷却速度、冷却用不活性ガスなどの凝固パラメーターの影響を検討することで、鑄放し品で F75 組成の機械的性質を満たす凝固時間範囲があることを見出した。

平成22年度は引き続き電磁浮遊溶解炉(コールドクルーシブル炉)及び制御冷却装置を使用し、凝固組織に及ぼす凝固パラメーターの影響を検討することで冷却速度制御の最適化を図る。BやTi等の第3元素の接種や遠心力により結晶粒微細化効果を確認し、実製品形状の関節部品の試作を行い、アドバイザーである川下事業者より知見を得ながらその評価を行う。これらの製造プロセスの改善により鑄造品における製造コストの低減を目指す。

2-2 実験方法

本年度では実製品形状の 28φ 骨頭モデル(以下 28φ 骨頭モデル)を取り上げ、実験を行った。LowCarbon および HighCarbon の炭素量を変化させた2種類の組成で実験を行った。いずれも ASTM F75 を化学組成的に満足し、LowCarbon 組成(以下 C 材という)は Co-29%Cr-6%Mo-0.05%C-0.15%N、HighCarbon 組成(以下 D 材という)は Co-29%Cr-6%Mo-0.25%C-0.15%N である。

a) 結晶粒微細化材、遠心力付加の影響の検討

平成21年度までで得られた結果を総括すると、F75 組成合金では、凝固時間が長くなるにつれ樹枝状晶が大きくなり、結果として、伸びおよび絞りが増加し、0.2%耐力および引張強さが減少すると推測される。また冷却速度だけでなく別の方法で樹枝状晶の大きさを制御できれば、機械的性質を満足することも可能であると考えられた。そこで、注湯直前の接種および遠心力によって、樹枝状晶の大きさが変化するかどうかを調べた。

a)-1 接種材の影響

注湯直前の接種材として、B, Ti を取り上げた。これは、F75 組成規格に成分として上限値が記載されていること、アルミ合金では結晶粒微細化材としてよく用いられていることによる。注湯直前に B(0.01%)のみ、Ti(0.1%)のみ、B(0.01%)・Ti(0.1%)同時添加を行い、無添加の試料と比較した。なお、鑄造直後の熱交換器は使用していない。

a)-2 鑄造時の遠心力の影響

注湯直前から 10Hz の回転数で回転させ、注湯直後も 5 分間回転し続けた。重力下で鑄造で鑄造した試料と比較した。なお、鑄造直後の熱交換器は使用していない。

b) 実製品への応用

平成21 年度に得られた知見として、熱交換器の操業圧力と鑄物の凝固時間との関係を図 2-1 および 2-2 に示す。図中の 0.4、0.6、0.8 および 1.1 は階段状試験片 5mm 部、10mm 部、15mm 部および 20mm 部の鑄物モジュラス(体積/表面積:単位 cm)である。

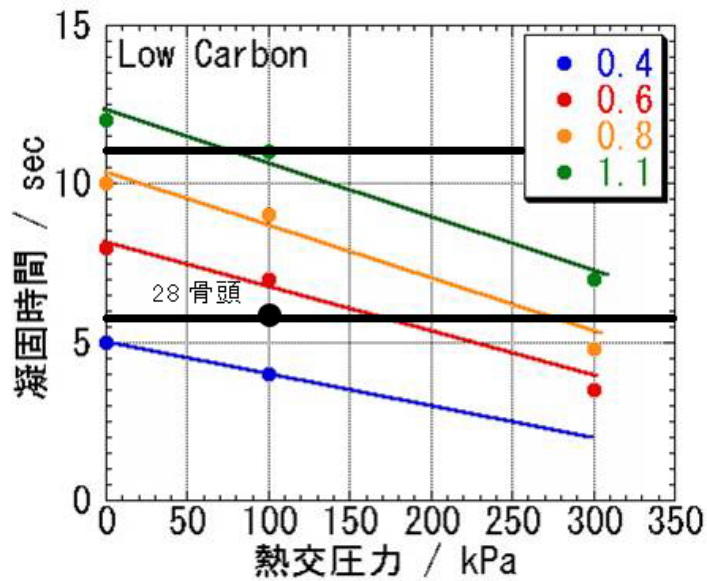


図 2-1 熱交換器の操業圧力と凝固時間の関係(C材の場合)

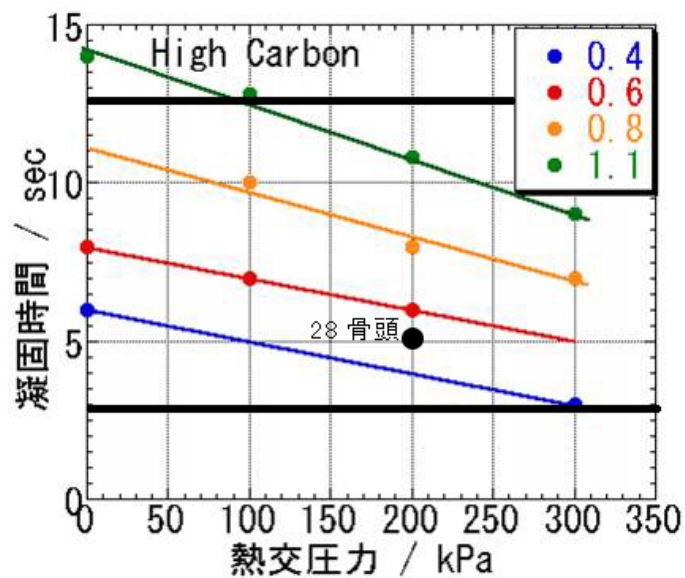


図 2-2 熱交換器の操業圧力と凝固時間の関係(D材の場合)

これらの図の中の黒い太線はF75規格の機械的性質を満足する下限と上限を示しており、C材では、5.7～11秒、D材では3～12.8秒である。

28φ骨頭モデルの鋳物モジュラス(製品体積/製品表面積、単位はcm)は計算すると約0.52c

mである。この製品を鑄放しで機械的性質を満足(伸びおよび絞りはぎりぎり、0.2%耐力および引張強さをできるだけ上げる条件)させようとする、C材では100kPa、D材では200kPaの操業が望ましいことが推測される。

上述の推測が正しいかどうかを検証するために28φ骨頭モデルで鑄造実験を行った。

2-3 研究成果

a) 接種材の影響

TiやBを添加することで樹枝状晶が小さくなる傾向にあった。TiやBを添加することで伸びおよび絞りに大きな変化がなかったが、0.2%耐力および引張強度は上昇する傾向にある。0.2%耐力および引張強度は上昇する傾向にあることは樹枝状晶が小さくなったことに起因しているのではないかと考えられる。伸びおよび絞りが大差なかったのは、樹枝状晶の隙間に存在する炭化物の形態がB,Tiによって変化したため、本来樹枝状晶の大きさの減少による伸びおよび絞りの低下が抑制されたのではないかと考えられる。詳細な理由はまだ不明であるが、いずれにせよB,Tiの添加によって伸びおよび絞りを低下させず、0.2%耐力および引張強度を上昇させる効果があることは、製品の機械的性質向上には有益に働くと考えられる。

b) 鑄造時の遠心力の影響

重力鑄造のものに比べ遠心力を付加することにより0.2%耐力および引張強さは上昇するが、伸びおよび絞りは大差がなかった。これは、樹枝状晶の二次枝成長の抑制に起因しているのではないかと考えられる。詳細な理由はまだ不明であるが、いずれにせよ遠心力によって伸びおよび絞りを低下させず、0.2%耐力および引張強度を上昇させる効果があることは、製品の機械的性質向上には有益に働くと考えられる。

c) 実製品への応用

凝固時間はC材のものでは約5.2秒、D材のものでは、約5秒であった。これらの結果は図2-1および2-2より推測された凝固時間(C材では5.8秒、D材では5秒)にほぼ一致しており、鑄放しでもF75規格を満足する製品を確実に製造できることが確認された。

以上のことから、図2-1および図2-2より予測した熱交換器操業条件で製造することにより実製品で鑄放しでF75規格の製品を確実に製造することができる。鑄放しで製品出荷できれば、後工程であるHIP処理や熱処理を省くことができる。42φヘッド・アウターのようなHIPや熱処理を施す製品モデルでは、これらの処理が省略されるので、約47%のコストダウンが実現される。

第3章 人工関節鍛造部品用荒地材の鑄造凝固組織制御技術の開発

3-1 研究目的及び目標

ニアネットシェイプ鍛造し易く、かつ強度劣化のない鍛造用荒地材を鑄造にて作製するため、電磁浮遊溶解炉及び制御冷却装置を用いて試作した鍛造用荒地材の凝固組織及び機械的性能に及ぼす鑄造方法及び制御冷却方法について検討を行い、最適な組織制御条件を確立する。

また、研究目標の成形性、機械的性能を得るための鍛造条件、熱処理条件を探る目的で棒状の鑄造試験材(鍛造用荒地材)から、変形率、鍛造性を考慮した寸法、形状の鍛造用試験片を数種類製作し、これを鍛造成形して機械的性能を評価する。また、エレマ加熱装置を用いて、試作荒地材の鍛造成形性、機械的性能に及ぼす熱処理条件及び鍛造条件の影響について検討を行う。あわせて、鍛造成形時のバリの発生状況及び鍛造成形品の形状寸法の測定評価を行う。さらにまた実製品形状の関節部品の試作およびその評価を行う。

これらのプロセス改善を行うことで、鍛造品における製造コストの低減を目指す。

3-2 実験方法

「ステム材」を対象品として、同製品の金型を使用し実験を実施した。平成21年度より、アドバイザーからの助言によって、F799組成の成分鑄塊とした。鍛造荒地材として、鑄塊の直径は40mm、長さ190mm(凝固モジュラス0.95m)である。鑄造品に比べて鍛造品荒地材ではできるだけマイクロ組織が小さいものが好まれると考えられるので、平成21年度では熱交換器操業下(操業圧力300kPa下)で鑄造を行った。しかしながら、鍛造時の圧縮率の効果により結晶粒が細かくなりすぎたためか、平成21年度の鍛造後の強度結果より伸びだけが満足しないという結果が得られた。そこで、平成22年度では熱交換器をかけずに鑄造することで、伸びおよび絞りを低下させないマイクロ組織とするようにして浪速鍛工株式会社に供給した。

平成21年度では鍛造歩留まりを上げるために余肉を極力減らすと、断面圧縮率が減るため鍛造効果が少なくなり、製品の欠肉や強度不足が起こった。それらを踏まえ、鍛造工程の中に予備工程として鍛練の工程(図3-1)を入れることによって、断面圧縮率を上げることを試みた。

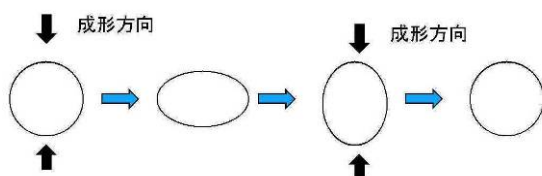


図3-1 鍛練概略図



図3-2 鍛練成型品

また、ネット鍛造出来る荒地材形状を検討した。基本は成形品総体積に余肉分(バリ部)を付け加えたネット鍛造試験用素材とした。

3-3 研究成果

鍛造荒地材 casting 時に熱交換器をかけずに casting することで、伸びおよび絞りをできるだけ大きくなるような冷却条件で casting したが、双方とも30%とかなり大きな値となった。それを、鍛練・鍛造するごとに機械的性質の改善が図られており、ネット形状の casting 材の型鍛造と、casting 材を鍛練加工し型鍛造すればF799規格を満足することがわかった。断面圧縮率を大きくできないようなバリを極力少なくするネットシェイプ鍛造を考える場合、鍛練工程は有効な手段であると考えられた。

ネットシェイプ鍛造を行う場合、歩留率が80%を超えるとF799規格の機械的性質を満足せず、さらに90%を超えると指示寸法内に製品形状が成形できないことがわかった。また、歩留を80%までとした casting ネット素材形状(図3-3)で熱間型打ち工程(鍛造)をおこなうことにより、設定寸法、F799規格を満たす鍛造材(図3-4)が作成できた。



図 3-3 casting ネット素材



図 3-4 鍛造ステム材

ステム鍛造品の1個あたりの製造コストは投入素材費用が80%以上を占め、鍛造費は20%に満たない。投入素材を削減することにより大幅なコストダウンが図られる事となる。

リターン材を使用して casting 荒地材を製造することにより、バージン材を利用して製造する場合に比べ約30%のコスト削減でき(第5章参照)、素材重量が1.55kgから1.1kgになったことにより素材費用の29%が削減できた。また、鍛造費に含まれる型費用は、ネット形状素材の投入により型彫り面の損耗の減少及び型寿命の延長から20%の削減ができる。

リターン材を有効利用した casting ネット素材による鍛造によって、CCM材ステムの製造コストをトータルで32.5%削減が可能となった。本研究の目標は達成された。

第4章 仕上げ機械加工の高速化・高精度化のための表面加工技術の確立

4-1 研究目的及び目標

試作合金の仕上げ加工性を評価するため、5軸マシニングセンター加工機を用いて、切削加工性に及ぼす加工条件及び工具種類の影響について検討した。また、CCM 合金の嵌合部表面の摺動性及び耐摩耗性の改善を図るため、電子ビームおよびレーザービームを用い、CCM 合金の表面溶融による表面改質法の検討を行った。

a) CCM 合金の切削加工性評価についての検討

5軸マシニングセンター加工機を用いて、試作合金の加工性を評価するとともに、加工効率を求め最速の切削工具および切削条件を探し出す。研磨工程は表面粗さ $Ra0.05 \mu m$ を確保しながら研磨工数を縮減し、実製品形状の試作を行い切削加工および研磨加工の 30%コスト低減を検討した。

b) 電子ビーム・レーザービームによる表面溶融加工技術の開発

本項は、コバルト-クロム-モリブデン（以下、CCM）合金製人工関節部品の仕上げ加工の高速化、高精度化のために、電子ビーム（以下、EB）およびレーザービームによる表面溶融加工技術を用いて CCM 合金の表面性状の改善について検討した。平成 21 年度では、EB の表面性状におよぼす加工パラメータの影響、EB と YAG レーザ（波長： $1.06 \mu m$ ）を組成の異なる CCM 合金に対して照射して、溶融領域やビードの高さに及ぼす加工パラメータの影響について検討した。その結果、平板材に対して、EB を照射した場合は、ドットピッチ（以下、dp）が $0.02 mm$ で、ビーム電流（以下、 I_{EB} ）が $1 mA$ で正方形面状に塗りつぶす照射するパターン（以下、面状処理）では、算術平均粗さ（以下、Ra）が $0.087 \mu m$ （#220 SiC ペーパーによって研磨）から $0.077 \mu m$ に減少した（目標値： $Ra=0.05 \mu m$ ）。また、パス間の重なりが無いように、1 パスで線状（以下、線状処理）に EB を照射するパターンでは、加工速度一定で、ビーム電流を増加させ、入熱を増加させることにより、溶融領域が増加した。溶融領域が増加すると、ビードの高さ Pt は増加した。ドットピッチが一定で、ビードの高さが増加すると、EB 照射後の表面粗さ Ra は増加する傾向だった。

1 パス照射時の EB のビードの高さと YAG レーザ（多重反射ミラー使用、ビーム幅を $8 mm^{\square}$ に調整）のビードの高さを比較すると、EB の場合は、 Pt が約 $0.6 \sim 13 \mu m$ （ $I_{EB}=0.5 \sim 5 mA$ 、 $v=6 \sim 48 m/min$ ）、YAG レーザの場合は、 Pt が約 $13 \sim 14 \mu m$ （ $P=1 kW$ 、 $v=1 \sim 1.5 m/min$ 、）であった。表面粗さのパラメータとしては、ビードの高さおよびパス間の距離が考えられるので、表面粗さの改善については、電子ビームによる表面溶融加工の方が有効なプロセスだと考えられた。一方、C 量が異なる CCM 合金に対して、EB を照射して形成された微細な組織についても不明瞭な点が多い。

そこで、本年度の研究では、(1) EB の照射エネルギー密度の低下による溶融池内の対流を小さくするために、焦点のはずし量、ビーム電流を変化させ、面状処理および線状処理を行い、EB 照

射後の表面粗さとの相関関係について、(2) 骨頭モデルに対する、EB-3D 照射方法について、(3) CCM 合金の EB 微細溶融部の成分について調査・検討した。

c) レーザビームによる表面溶融加工について

平成 21 年度に引き続き、CCM 合金に対してレーザビーム照射による表面溶融加工を行い、表面性状、組織制御及び機械的性質の改善の可能性について検討した。

d) 摩擦摩耗試験評価

高い耐摩耗性と耐腐食特性を有する Co-Cr-Mo 鋳造合金は、人工関節の素材として利用されている。人工関節は Co-Cr-Mo 合金製骨頭と超高分子量ポリエチレン(UHMWPE)製のカップの組み合わせからなるが、ポリエチレンの摩耗により、人体への悪影響が報告されているほか、人工関節のゆるみが生じ、製品寿命が低下することが問題として指摘されている。そこで、近年、Co-Cr-Mo 合金の骨頭とカップの組み合わせからなる metal on metal 勘合の人工関節が開発されてきている。この Co-Cr-Mo 人工関節は、通常、ロストワックス法で製造されている。鋳造欠陥をなくし、機械的特性を改善するために、さまざまな熱処理が施され、その結果、結晶粒が粗大化している。

本研究では、表面の硬さや耐摩耗性を向上させることを目的として、Co-Cr-Mo 鋳造合金表面に電子ビーム(EB)照射を行い、急冷凝固による結晶粒微細化と炭化物形状をコントロールする方法について検討し、微細組織が硬さや耐摩耗性に及ぼす影響について考察を進めた。

4-2 CCM 合金の切削加工、研磨加工の高速化の検討

a) 実験方法

平成 21 年度までは、5 軸マシニングセンターを使用して、CCM 合金の高速機械加工を行うため使用する工具は超硬ボールエンドミルを使用していた。ただし更なる機械加工のコスト削減には高寿命の工具を使用し、高速加工を行いできるだけ短時間で製品を仕上げるのが重要となる。そこで今回はさらに高速機械加工を行うための工具として CBN 電着工具を取り上げ、加工を行った。因子として回転数、切り込み量、ピックフィードおよびテーブル送り量を取り上げ、加工時間や表面粗さおよび CBN 粒子の摩耗量で評価した。また CBN 電着工具で切削後に研磨加工を行い目標表面粗さが $Ra0.05 \mu m$ になるまでの時間を測定した。平成21年度までの結果として、加工性にはC量の影響がほとんどなかったため材料はC材組成のみとした。鍛造材でも同等の加工ができるかどうかについて、鍛造材(F799 組成)のステム材から、ワイヤーカットで15mm 角 x100mm に切り抜き、前述と同様の試験を行った。

実製品モデルとして膝形状の製品を取り上げ、加工・研磨を行い、一般的な超合金の加工コストと比較した。実製品モデルとして膝形状のモデルを取り上げた。なお材料はC材組成とした。

b) 研究成果

一般的に CBN は高硬度材に主に使われているが CCM 合金の高速仕上げ切削にも有利だと推察される。CBN 電着チップは今まで使用してきた超硬工具より Ra が大きくなる傾向にあった。また、電着方式だと摩耗は観察できたが、粒子の脱落や粒子間の目づまりはなかった。さらに、テーブル送りを大きくし、高速で使用しても CBN 粒子の脱落や粒子間の目づまりもなく、工具寿命が安定していた。したがって、CCM 合金の仕上げ切削にも適していると思われる。しかしながら、工具軸方向の切り込み量が $0.05mm$ と小さいので、実製品形状の荒加工の削り残しや削り過ぎが CBN 電着工具の工具寿命や仕上げ表面粗さなどの製品品質に悪影響を及ぼす可能性もある。したがって実製品形状での確認が必要だと思われる。

なお、同様の実験を鍛造品(F799 素材)でも行ったが、結果はほとんど同じであった。

CBN 電着工具で加工した角材(面粗さ $Ra0.76 \mu m$)を 240 番、400 番、800 番の研磨紙で1分間磨き後に、表面粗さを測定した。800 番の研磨紙が表面粗さ $Ra0.212$ に仕上がり 3 種類の番手で表面粗さの向上が一番良く、いままでの研磨工程の省略が出来ると考えられる。また、同様の実験を鍛造品(F799 素材)でも行ったが、結果はほとんど同じであった。

実製品形状を電着工具を使用して試作加工し、今まで試験片で加工した場合の条件が使用でき、同じ粗さ曲線になるどうかを確認した。切削加工は荒削りを超硬ボールエンドミル(図 4-1A)で行い、仕上げ削りは、CBN 電着工具(図 4-1B)で行った。仕上げ加工後の表面粗さは $Ra0.67 \mu m$ であり、超硬エンドミルの場合と比較すると Ra は増加した。しかし、仕上げ加工時間は約半分になった。また表面の断面曲線は試験片加工時に得られた曲線と大差がなかった。以上から CBN 電着工具の特徴を実製品形状でも発揮できることが確認された。



A.粗加工後の外観

B.仕上加工後の外観

C.研磨後の外観

図 4-1 膝製品の加工外観

膝の研磨を 400 番シリコンカーバイト(研磨紙)から始めていたのを #800 シリコンカーバイト(研磨紙)から始めた。試験片結果と同様に、山谷のピッチが細かいことが影響し #800 からでも表面粗さは早く向上した。また、番手の粗い研磨紙を使用することがなかったのも、粗い番手の深いキズが残り前の番手に戻ることが無くなり、工程数が縮減され研磨時間の短縮になった。

CBN 電着工具を使用することにより、切削加工ではテーブル送りを約4倍にでき、切削後の表面粗さは研磨工程の能率が良い表面粗さとなった。このため両工程で時間短縮が出来、図 4-1C のように要求規格を満足した製品を作ることができた。

削り代も 1 ミリ以下で精度よくできており仕上げ加工前の残り代も一定にできた。また本研究で製作した実製品形状の保持具も安定して固定でき、切削中のビビリも無く工具寿命や切削面粗さに悪影響が無かった。

平成21年度時点での加工および研磨コスト(超硬工具を使用した場合のもの)は合計 25,798 円/個(月産 100 個ベースで計算)であった。このコストは、5軸加工機で加工を行った場合の平均的な日本でのコストである(オブザーバーからの助言による)。仕上加工を CBN 電着工具で行い、加工条件を最適化することで、研磨工程の工数簡略化が達成されるため、コストも下がり、合計 15,609 円/個となった(月産 100 個ベースで計算)。したがって約 39%のコストダウンとなり、本研究の目標は達成された。

4-3 電子ビーム・レーザービームによる表面溶融加工技術の開発

a) 実験方法

供試材料としては、C量が異なる2種のCCM合金真空鋳造材を用いた。C量が0.1 mass%のものは、C材(LowC材)、C量が0.24 mass%のものはD材(HighC材)とした。供試材料が平板材の場合、 $30 \times 30 \times 200$ mmの角棒を $30 \times 30 \times 5t$ mmに切断し、EB照射試験に供した。供試材料が骨頭モデルの場合、NC旋盤により外形を加工し、EB-3D試験に供した。また、切削速度と送り量を変化させて、表面粗さを $Ra=0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ に調整した。

平板状試験材の場合、焦点のはずし量、ビーム電流を変化させ、面状処理(図4-2(A))と線状処理(図4-2(B))の2種のパターンのEB照射試験を実施した。EB照射条件については、加速電圧は40 kV、収束電流は1025 mA、クロック周波数は10 kHz、ドットピッチ(以下、dp)は0.02 mmで一定とし、焦点ずらし量(図4-2(C))を3 mm(WD=203 mm、just focus時WD=200 mm)、5 mm(WD=205 mm)、ビーム電流は0.5 ~ 5 mAに変化させた。

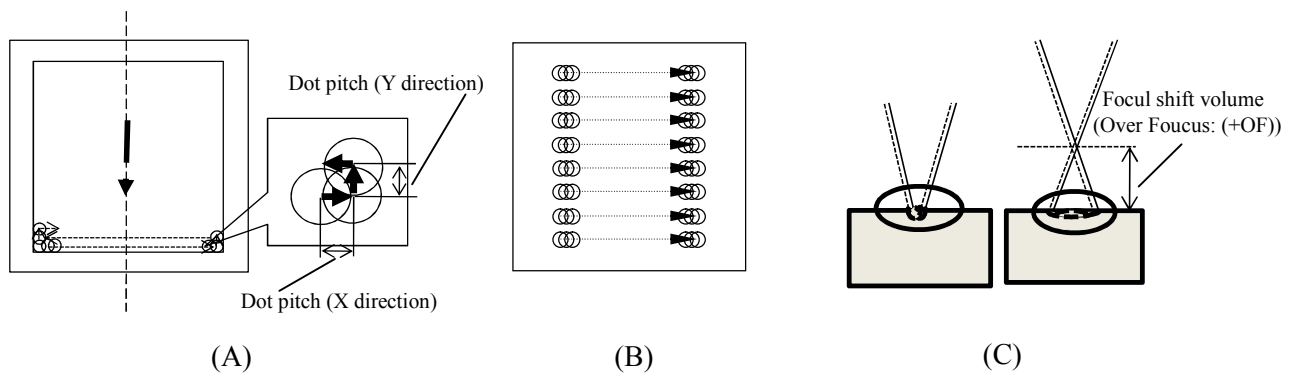


図 4-2 EB照射試験の概略図

(A: 面状処理、B: 線状処理、C: 焦点はずし量)

骨頭モデル試験材のモデルの場合、試験材の一端を固定して、加工幅10 mmでEBを往復させながら、回転速度 $97^\circ/\text{min}$ で回転させた。なお、EB照射条件は、加速電圧は40 kV、ワーキングディスタンス(WD)は300 mm、クロック周波数は10 kHz、ドットピッチ(以下、dp)は0.02 mm、ビーム電流は1 mAで一定とした。

EB照射試験後、断面組織観察(SEM、TEM)および成分分析、硬さ試験、表面観察、粗さ曲線、断面曲線の測定を行い評価した。

b) 実験結果および考察

図4-3にD材(HighC材)に対して、EBを照射した場合の、EB照射部の算術平均粗さ(Ra)におよぼすビーム電流と焦点はずし量の関係を示す。ジャストフォーカスでEB照射した場合、0.5 mA~1 mAではRaは減少する。ビーム電流が1 mAでRaは最小になり、 $Ra=0.084 \mu\text{m}$ になった。ビーム電流を1 mAから3 mA、5 mAに増加させると、Raは増加し、5 mAでは $Ra=0.24 \mu\text{m}$ にな

った。焦点はずし量を 5 mm にした場合、ビーム電流が 1 mA で最小になり、 $Ra=0.045 \mu\text{m}$ になった。焦点はずし量を固定して、ビーム電流を増加させると、 Ra は増加し、ビーム電流が 2 mA では、 $Ra=0.11 \mu\text{m}$ になった。焦点はずし量が 10 mm の場合、ビーム電流が 2 mA で最小になり、 $Ra=0.087 \mu\text{m}$ になった。ビーム電流を増加させると Ra は増加し、ビーム電流が 3 mA では、 $Ra=0.12 \mu\text{m}$ になった。

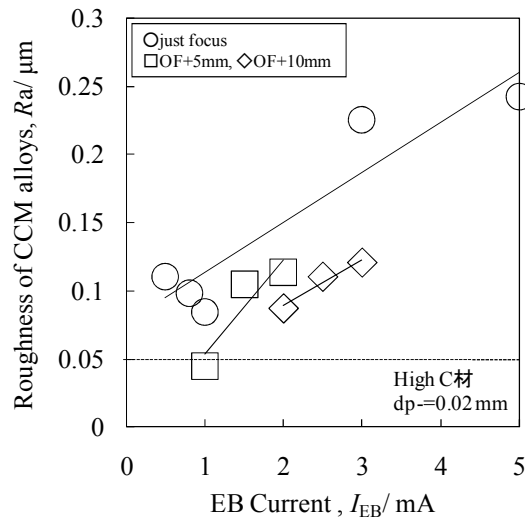


図 4-3 EB 照射部の表面粗さ (Ra)におよぼすビーム電流と焦点はずし量の関係
(D 材 (HighC 材)、 $dp=0.02 \text{ mm}$)

また、骨頭モデルに対して、ドットピッチ 0.02 mm、ビーム電流 1 mA、回転速度 97.8 度/min の条件で EB を照射した場合 $Ra=0.11 \mu\text{m}$ から $Ra=0.15 \mu\text{m}$ となった。骨頭モデル試料 EB-3D 照射後の供試材には、CCD カメラのレンズ部が投影されていた。EB 未照射部には、骨頭の円周方向に切削痕が認められた。EB 照射部には切削痕は認められず、EB の走査方向に対して水平方向に切削痕とは異なる凹凸が認められる。

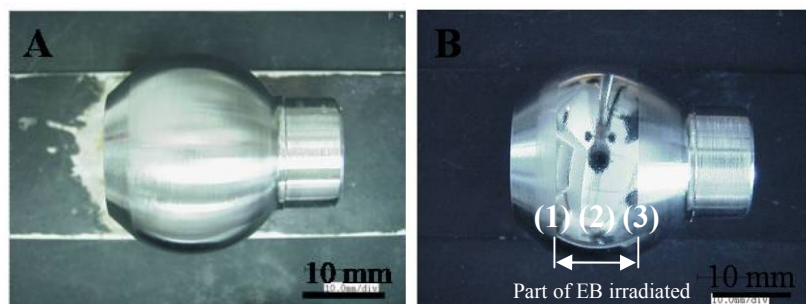


図 4-4 EB-3D 照射試験前後の骨頭モデル試料外観
(A: 切削材、B: EB-3D 照射材)

c) レーザビームによる表面溶融加工について

平成 21 年度に引き続き、CCM 合金に対してレーザビーム照射による表面溶融加工を行い、表面性状、組織制御及び機械的性質の改善の可能性について検討した。

まず、レーザビーム照射による表面性状の改善についての検討では、CCM 合金素材の表面をブラスト加工、研磨紙 (# 220) による研磨加工及びレーザ吸収剤塗布処理のビーム照射後の表面性状への影響について検討した。ブラスト加工面へのレーザ照射の場合、加工表面は溶融部の外周は酸化により青色に変色しているものの滑らかな外観形状を示し、もともと良好な表面形状を示した。研磨加工の場合は、溶融部での酸化により灰色に変色し、表面性状も荒れていた。さらに、吸収剤を塗布した場合、レーザ吸収性は向上したと考えられるが、シールドを行わなかったために、表面の凹凸が激しく、内部からのガスが噴出したと思われる多数の穴が形成された。また、レーザ照射は効率良く表面を溶融することができるが、条件によっては割れ等の欠陥発生の危険があるため、実施工においては留意しなければならない。

レーザビーム照射の場合、溶融幅は、約 2.4 mm であり、電子ビーム照射の場合の 0.2 mm に比べて 10 倍以上の領域を 1 回のビーム照射で溶融可能であった。いずれの照射方法でも表面にはビームの移動過程でビームスポットの形態に対応して固-液境界線(リップル線)がうろこ状の模様となって均一に形成されている。レーザビーム照射の断面曲線では、ビーム照射部(ビード部)は、やや盛り上がる傾向にあり、ビード部の両端(母材との境界付近)では、急激に凸状となっていることがわかった。最大の高差は、 $13\ \mu\text{m}$ であった。ビード内部でも最大で数ミクロン程度の高差があることが分かった。一方、電子ビーム(EB)では、ビード両端は、レーザ照射の場合と逆に凹状になり、ビード中心では凸状となり、その高差は $4.4\ \mu\text{m}$ であった。

以上のようにレーザビーム照射では、電子ビーム照射法に比べて広範囲に表面溶融処理が可能であるが、その表面あらさは、数ミクロン程度であり、レーザビームによる表面溶融加工のみでは、本研究の表面粗さ目標値($R_a=0.05\ \mu\text{m}$)を達成するのは困難であった。したがって、他の加工法との組み合わせによる加工法が必要と考えられる。

以上のことから、レーザビームによる表面溶融加工は、電子ビーム法に比べて、効率よく大面積を溶融加工できるが、表面あらさの向上には限界があった。しかし、組織評価及び硬さ試験結果から、照射部の性能にはプロセスの差異はほとんどないことが分かった。

d) 結言

表面粗さの目標値 ($R_a=0.05\ \mu\text{m}$)を達成するため、平板状試験と骨頭モデルに対して、レーザビーム及び電子ビーム照射試験を行った。また、レーザビーム溶融加工での溶融部の性能評価を行った。主な結果を以下にまとめた。

1. 電子ビーム照射法で平板状試験材に対して、焦点はずし量+5 mm、ビーム電流 1 mA の条件で EB を照射した場合で表面あらさ $R_a=0.05\ \mu\text{m}$ となり、目標値を達成できた。その場合の溶け込み深さは $20\ \mu\text{m}$ であった。
2. また、骨頭モデルに対して、ドットピッチ 0.02 mm、ビーム電流 1 mA、回転速度 97.8 度/min

の条件で EB を照射した場合 $Ra=0.11 \mu m$ から $Ra=0.15 \mu m$ となった。

3. レーザビーム照射法では、表面の清浄度が良く、表面欠陥が発生しない最適加工条件では、溶融幅は $2.4 mm$ で表面あさは、数ミクロン程度であった。またレーザビーム照射部の溶融深さは、約 $200 \sim 300 \mu m$ であり、レーザビーム照射部の硬さは、電子ビーム照射法の場合とほぼ同等の硬さを示した。

4-4 摩擦摩耗試験評価

a) 実験方法

供試材料としては、Cを0.24%含むCo-Cr-Mo 鑄造合金(D材)を使用した。EB照射された表面の微細組織は光学顕微鏡およびSEMにより観察した。結晶構造はXRDによって行った。析出する炭化物についてはEPMAによってZAF補正を行い、定量分析を行った。表面の硬さはビッカース硬度試験(10gf、10s)によって評価した。摩耗特性は、VIC インターナショナル株式会社製疑似体液中摩擦摩耗試験機 VWM-2500-T により評価した。疑似体液としては、ハクス液を用い、これを35~36℃となるよう温度管理を行った。

b) 研究成果

b-1) EB 溶融層の厚さ

ビーム電流が増えるに従い、溶融層の厚さも増し、溶融層厚さはビーム電流の増加に伴い指数関数的に増加する。通常、電子ビーム溶接のビード深さは照射電流の増加に従い直線的に増加することが知られている。この表面改質法では、電子ビームは走査されるため同一箇所が複数回溶融されることになる。電流の増加にともない、溶融幅が大きくなり、溶融回数も増す。そのため、母材温度も高くなるため、溶融深さが大きく増加していくものと考えられる。試料温度は測定していないが、8~10mAのビーム電流にした場合は、表面改質の終了時に試料が赤く色づいており、温度が高くなっていることが目視で確認できた。

b-2) 微細組織の構造

母材となる鑄造合金とEB照射面のXRDの結果、鑄造合金、EB照射面ともに、 γ 相(FCC)と ϵ 相(BCC)がみられた。Co-Cr-Mo鑄造合金の結晶粒サイズは100ミクロン以上であり、ピーク強度比はASTMデータのものとは異なっている。また、原子サイズがCoやCrよりも大きいMoが固溶しているため原子間隔が広がり、ピークの低角度側へのシフトもみられる。また、炭化物のピークはきわめて小さく、鑄造材と8mAの溶融面にわずかにみられるのみであった。一方、鑄造材にはみられる炭化物は、EB溶融層にはこれらの炭化物が一見、消失しているようであるが、微細なセル構造になっていることがわかる。セルの大きさは1mAのときももっとも小さく、1ミクロン以下であった。ビーム電流の増加に伴い、セルのサイズも大きくなっていく。セル境界にはMoやCのミクロ偏析が認められた。Co-Cr-Mo三元系状態図では、Moの増加に伴い、液相線が低下する。まずはCoリッチな高融点相が析出し、最終凝固域にMoが多く偏析したものとみられる。同様に、セル境界にはCも多い。析出物は炭化物である可能性があるが、同定のためにはより詳細な分析が必要である。

炭化物としてCrリッチの炭化物とMoリッチの炭化物が認められる。これら2種類の炭化物をEPMAにより定量分析した結果、 $M_{23}C_6$ 、 M_6C に相当する組成であることがわかった。また、8mAの電子ビームを照射した表面にみられる粒状析出物は、 $M_{12}C$ 、 $M_{23}C_6$ および M_7C_3 に相当することが明らかとなった。

b-3) EB照射が表面硬さに及ぼす影響

電子ビーム照射部では、硬さのばらつきは小さくなり、バルク平均値も高くなった。なお、ビーム電流の量と硬さの間には明らかな関連性はみられなかった。いずれにしても、ネットワーク状の析出物相と微細炭化物の均一な分布が硬さの向上に寄与しているものと考えられる。

b-4) EB 照射が耐摩耗性に及ぼす影響

耐摩耗性を調査するために、まず、乾式の摩擦試験を行った。負荷荷重は 5N とし、100 mm/s の速度で摺動させ、摺動距離 1km ごとに重量変化を調べた結果、母材のデータに比べ、EB 照射した試料の耐摩耗性は 1mA の試料で改善がみられたものの、その他の条件では却って低下してしまった場合が多い。次に擬似生体液(擬似生体液としては、ハンクス液を用いた)中における摩擦摩耗試験を行った結果、10km の摩耗試験後の重量減は、鋳造母材で 6.3 mg、EB 処理材(5 mA)で 6.4 mg とほぼ同等であった。鋳造母材の摩耗痕の幅は EB 処理材の摩耗痕の幅に比べると広い。一方、摩耗痕深さは鋳造母材で約 18 μm と EB 処理材の値 27 μm に比べると浅いことが分かった。

EB 処理によって表面粗さが低下し、後加工処理の時間が短縮できることは昨年度報告したとおりである。つまり、耐摩耗性を損なうことなく、後処理加工できることが明らかとなった。

c) まとめ

本研究では、まず、C を 0.24% 含む Co-Cr-Mo 鋳造合金表面を EB 照射により溶融し、表面粗さを改善できることを見出した。後加工にかかる時間を短縮させることが期待できる。加えて、ビーム照射条件によってはネットワーク状、あるいは微細な粒状の析出物が表面に析出し、その組織をある程度コントロールできる。擬似体液中における耐摩耗特性は EB 照射によって損なわれないことが判明し、仕上げ機械加工の高速化、高精度化のために EB 照射が有用であることが明らかとなった。

第5章 人工関節部品製造の低コスト化に対応するための材料リサイクルシステムの構築

5-1 研究目的及び目標

平成 21 年度までの研究において、CCM 合金の溶解、鋳造、鍛造及び機械加工で発生する残材、バリ、切削屑など廃材として取り扱われている CCM 合金の完全リサイクルを達成するため、廃材の形態調査及び成分分析を実施することにより加工工程での汚染状況を調査し、溶解実験を行った。その結果、鋳造で発生する返り材は、鋳物黒皮をショットで落とし酸洗工程をおこなうことで F75 溶解用マスターアロイに使用できることがわかった。また、鍛造加工で発生するバリは、表面の酸化や離型剤の炭化などにより黒褐色の皮膜が形成されているが、皮膜直下の組成は、素材成分とほとんど変化がなく、ショットおよび酸洗することでリサイクルでき、F75 溶解用マスターアロイ原料として使用できることが明らかになった。また、切削加工において切削油等を除去することができれば切粉の成分はほぼ素材と同様であることから、簡単な洗浄でリサイクル可能であることが示唆された。

これらを踏まえ、本年度では、平成 21 年度の研究課題(加工残材の回収方法、固化方法、洗浄および再溶解方法)について引き続き実験を行うことにより、最適なリサイクル手法を決定することとし、本方法を実際の溶解工程に試験導入するなどの実証試験を行い、リサイクルシステムを構築することを目的とする。

5-2 実験方法

まず、鋸盤、旋盤、マシニングセンタ等の切削加工工程において回収され鋳造現場に返送されてきた切削屑を、表 5-1 に示す各種洗浄方法にて脱脂を行った。

表 5-1 切粉の各種洗浄方法

1 予備処理	・ペール缶(20L)に切粉を一週間保管し、切粉に付着している油分をペール缶底部に沈降させる ・300g 計量し、砂等の付着物を除去するため、水洗した後自然乾燥
2 脱脂処理	(1)約 80℃の温水での洗浄を 10 回繰り返す (2) 中性洗剤(5vol%)での洗浄を 3 回繰り返す → 水洗(泡が消えるまで) (3) 1M-NaOH 水溶液での洗浄を 3 回繰り返す → 水洗(蔞酸で中和を確認) (4)エタノールでの洗浄を 3 回繰り返す → 水洗(水が白濁しなくなるまで) (5)アセトンでの洗浄を 3 回繰り返す → 水洗(水が白濁しなくなるまで) (6)300℃で 2 時間加熱 → 水洗 (7)400℃で 2 時間加熱 → 水洗 (8)500℃で 2 時間加熱 → 水洗

次に、組成既知のブロック 150g と洗浄した切粉 250g を、真空溶解炉にて 1.0×10^{-2} Pa まで減圧後純度 99.99% Ar を充填し 1 気圧とした雰囲気です灰坩堝を用いて溶解し、 $\phi 32 \times 100$ mm Cu 金型に鑄造し、これを切り出して O、N 分析を C、S 含有量の分析、化学成分の分析を行った。

洗浄後の切粉の化学組成、溶解時の熔湯表面状態、並びに再溶解後の化学組成、顕微鏡組織から総合的に最適な洗浄方法を決定した。

5-3 研究成果

a) 回収方法

切削加工工程では、工具寿命向上等のため S を含む潤滑油を用いて加工が行われる。通常切粉は、表面酸化を防止するため切削油を含んだ状態のまま回収され容器中で保管していることから、今回の CCM 合金においても同様の回収方法とした。

b) 固化方法

Mg 合金等の活性な(融点付近で酸化しやすい)金属を再溶解する場合や、高周波誘導溶解により再溶解する場合には、表面積を小さくするため、あるいは誘導加熱の効率を向上させるために、切粉は加熱しプレスすることで固化させブリケット状にすることが通常行われている。

本研究では、一旦 CCM 合金切粉のブリケット化を行うこととしていたが、CCM 合金の強度が高いため、プレス後のスプリングバックにより固化することが困難である。このため本研究では、切粉の再溶解は、ブロック状の新材と切粉を坩堝内部に装填し溶解することとした。

c) 洗浄および再溶解法

c-1) 洗浄の必要性について

CCM 合金は、石灰坩堝を用い真空溶解炉中で溶解・鑄造される。このため、切削油の洗浄が不十分であれば、加熱中に真空炉内部で付着している切削油が熱分解し、炉内を激しく汚染することから、炉内清掃等のメンテナンスに著しく手間がかかることになる。図 5-1 に、切削油が付着した切粉約 3kg を大気炉中で 500°C まで昇温した際の切削油の熱分解ガスの発生状況を示す。著しく多量の熱分解ガスが発生することがわかる。

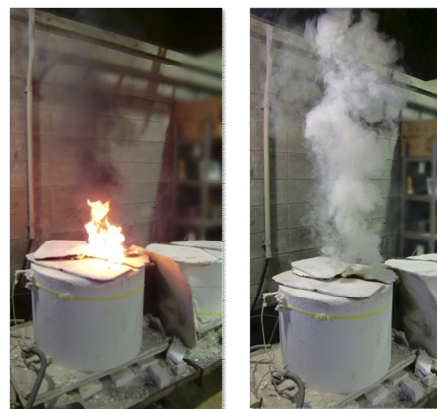


図 5-1 切削油の熱分解によるガスの発生状況
(左)自然着火した状態 (右)消火した状態

表 5-2 に、溶解時の発煙の状態、および熔湯表面の状態を示す。溶解時の状況から、 500°C で熱分解する方法が最も良好な状態であった。

表 5-2 溶解時の発煙および熔湯表面の状態

洗浄方法	発煙状態	熔湯表面の状態
(1)約 80℃の温水で洗浄	炉内が煙で充満	確認不能
(2) 中性洗剤(5vol%)で洗浄	少し発煙	スラグは少ない
(3) 1M-NaOH 水溶液で洗浄	発煙多い	熔湯表面良好
(4)エタノールで洗浄	少し発煙	スラグやや多い
(5)アセトンで洗浄	少し発煙	スラグやや多い
(6)300℃で 2 時間加熱	わずかに発煙	良好
(7)400℃で 2 時間加熱	わずかに発煙	良好
(8)500℃で 2 時間加熱	煙が出ない	最も良好

c-7)リサイクル材回収プロセスとそのコスト試算

平成 21 年度までの結果で、鑄造返り材および鍛造バリについてはショット・酸洗することでリサイクルが可能であることが溶解実験で判明している。本年度切削加工工程で発生する切粉についても 500℃で加熱することで溶解時に発煙せず溶解でき、きれいな鑄塊が得られることがわかった。3年間の実験を統括すると、鑄造工程・鍛造工程および機械加工工程より排出するスクラップの回収方法として図 5-2 のプロセスにて、リサイクルが可能となることがわかった。

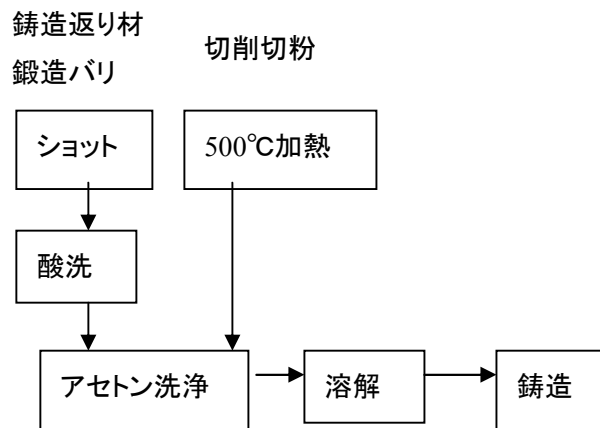


図 5-2 材料リサイクル工程図

これらの工程で一時溶解材(マスターアロイ)のコスト試算を行ってみた。スクラップ原料引き取り費用を抜いて計算すると、処理費用として約 3,500 円程度であった。現在バージン材が約 4,500 から 6,000 円/kg(リーマンショック以前ではコバルト原料は 13,000 円/kgまで高騰していた。)で推移していることを考慮に入れると原料費においても約 30%程度のコストダウンが可能と考えられる。

d)まとめ

本研究により、以下のことが明らかとなった。

1. 切削油に含まれる C 含有量については、400℃、500℃での熱分解が最も効果的に除去できる。
2. 切削油に添加された S 含有量については、すべての方法で上限以下の含有量で、エタノール洗浄、400℃、500℃での熱分解が最も効果的に除去できる。
3. 材料強度に影響を及ぼす N 含有量については、洗浄または熱分解のための加熱の前後であまり変化がない。
4. O 分については、加熱時着火した試料で上昇するものがあったが、石灰(CaO)坩堝を用いた溶解時に、Al、Si の添加で十分脱酸できる。
5. 切粉表面には、残留した油分のほか、切削工具由来の W、Fe や砂等の異物の付着が確認された。
6. 切粉を再溶解し化学組成を分析したところ、C 以外は洗浄方法によらず規格内の値を示した。
7. 切粉に付着した切削油の除去は、リサイクル材の化学組成および作業性や熔製時の熔湯の状態等から、500℃で熱分解する方法が最適であると言える。
8. 本研究で判明したリサイクルシステムを利用し、リサイクル材を積極的に利用することで、溶解用原料のコストを最大 30%削減可能であることがわかった。

第6章 全体総括

6-1 成果の総括

本事業の目的・目標は、CCM 合金製人工関節部品の高強度化、高機能化、低コスト化及び短納期化を図るため、電磁浮遊溶解炉や不活性ガスを利用した熱交換方式の制御冷却装置により、高品位溶解の実現及び鑄造工程における凝固・冷却速度の可変による凝固組織制御技術を確立することで、現行鑄放し品の引張強度、伸び等の機械的性質の 20%向上、鑄造及び鍛造による製造コストをそれぞれ 40%及び 30%低減を目指すことや、また、人工関節のメタルーメタル嵌合を実現するため、高精度切削加工技術及び表面改質技術の開発を行い、現状関節品(メタループラスチック嵌合)と同等以上の摺動性・耐摩耗性を確保すること、さらに、人工関節部品製造の低コスト化に対応するための CCM 合金のリサイクルシステムを構築し、各製造工程での端材等の回収材料の 100%再利用を目指すことにある。

本事業で得られた成果をまとめると次のようになる。

(1) 人工関節鑄造部品の鑄造時制御冷却法による凝固組織制御技術の確立

前年度に引き続き凝固組織に及ぼす材料組成、冷却速度、冷却用不活性ガスなどの凝固パラメータの影響を検討することで、鑄放し品で F75 組成の機械的性質を満たす凝固時間範囲があり、凝固時間は製品の鑄物モジュラス(鑄物体積/鑄物表面積)や鑄物冷却時も熱交換器のガス圧により変化することを見出した。これにより、鑄放し状態で F75 規格の機械的性質を満足するための鑄造操業条件を検討するための基礎的データを得ることができた。またこのデータが実際に実製品に役立つかどうかを検証する目的で、実製品形状モデルとして骨頭を例に取り上げ、実験を行った結果、データより予測された値(C 材のものでは約 5.8 秒、D 材のものでは、約 5 秒)と実験値(C 材のものでは約 5.2 秒、D 材のものでは、約 5 秒)はほぼ一致した。HIP 処理や熱処理を省くことで最大 47%のコストダウンを図ることができることが分かった。

(2) 人工関節鍛造部品用荒地材の鑄造凝固組織制御技術の開発

上記の鑄造法を用い、鍛造後の機械的性質を考慮して作成された棒状の鑄造試験材(鍛造用荒地材)を用いて鍛造成形性の検証、機械的性能を得るための鍛造温度条件を模索した。鍛造実験には精密な温度管理が可能な実験炉(エレマ加熱炉)を使用し、温度パターンを選択しながら型打前工程に予備鍛錬を追加、鑄造材に熱処理を追加して要求される機械的性能を得る鍛造方案を確立した。また、素材費を大幅に削減するネット化の研究も行い実製品形状の関節部品を製作し、その評価を行った。荒地材の形状を種々検討することにより、鍛造品における製造コストをトータルで最大 32.5%削減が可能となった。

(3) 仕上げ機械加工の高速化・高精度化のための表面加工技術の確立

前年度に引き続き、切削加工においては CCM 合金の加工条件、工具種および研磨工程に

について検討し、仕上げ加工に CBN 電着工具を用いることにより、後工程である研磨工程の工数が簡略化でき、最終表面粗さ Ra0.05 とするコストを国内平均と考えられる平成21年に試算した金額より 37%削減できた。

CCM合金製人工関節部品の仕上げ機械加工の高速化・高精度化を図るため、電子ビーム(以下、EB)による磨き加工技術を用いて CCM 合金の表面性状の改善に取り組んだ。EB の照射エネルギー密度の低下による熔融池内の対流を小さくするために、焦点のはずし量、ビーム電流を変化させた実験を、平板上試験で行った結果、平板状試験材に対しては焦点はずし量 +5 mm、ビーム電流 1 mA の条件 EB を照射した場合で Ra=0.05 μ m となり、最終目標あらさを達成することができ、その場合の溶け込み深さは 20 μ m であった。また実製品モデルとして骨頭モデルを取り上げ、同様の実験を行った結果、ドットピッチ 0.02 mm、ビーム電流 1 mA、回転速度 97.8 度/min の条件で EB を照射した場合 Ra=0.11 μ m から Ra=0.15 μ m となった。

一方、レーザービームによる表面熔融加工では、電子ビームに比べて広範囲にかつ、均質に熔融加工が可能であることを示したが、表面あらさは電子ビームプロセスに比べ大きくなり易い傾向を示した。平成 22 年度は、レーザー吸収を改善するため、吸収材の塗布や試験片の表面あらさの影響を検討し、レーザー照射前にブラスト処理を行ったもので良好な表面性状を得ることを示した。硬さについては、電子ビームプロセスとほぼ同程度の硬さ HV400~600 になること示した。

以上により電子ビームプロセスは、レーザービームプロセスに比べ表面あらさを大きく低減できる(目標値:Ra=0.05 μ m)プロセスであることを示した。さらに、耐摩耗性を損なうことなく仕上げ加工を高速化・高精度化できることも明らかにした。

またCCM合金に分散する大きな炭化物は、電子ビーム照射によって、一旦マトリックス中に強制固溶され、凝固時にネットワーク状に析出物を生成し、ビーム電流が大きくなると、それらは微細な粒状の炭化物となることがわかった。電子ビーム照射によって鑄造合金の平均硬さは 410 HV から 480~530 HV へ増加し、乾式摩擦摩耗試験では耐摩耗性はかえって低下したが、疑似体液中での摩擦摩耗試験では、10 km の摩耗試験後の摩耗量はほぼ同等であり、摩耗痕の幅は鑄造合金よりも狭くなることが確認できた。

以上により電子ビーム処理によって表面粗さが低減し、すなわち、耐摩耗性を損なうことなく仕上げ加工を高速化・高精度化できることが明らかとなった。

(4) 人工関節部品製造の低コスト化に対応するための材料リサイクルシステムの構築

CCM 合金の溶解、鑄造、鍛造及び機械加工で発生する残材、バリ、切削屑など廃材として取り扱われている CCM 合金の完全リサイクルを達成するため、廃材の形態調査及び成分分析を実施することにより加工工程での汚染状況を調査した。その結果、鍛造加工で発生するバリは、表面の酸化や離型剤の炭化などにより黒褐色の皮膜が形成されているが、皮膜直下の組成は、素材成分とほとんど変化がなくなりサイクルがし易いことが示された。また、切削加工において切削油等を除去することができれば切粉の成分はほぼ素材と同様であることから、簡単な洗

浄でリサイクル可能であることが示唆された。また、加工残材の洗浄および再溶解方法について検討を行ったところ、切粉に付着した切削油の除去は、リサイクル材の化学組成および作業性や熔製時の熔湯の状態等から、500℃で熱分解する方法が最適であることがわかった。

以上により鑄造工程・鍛造工程および機械加工工程より排出するスクラップはすべて回収でき、原料費コストも最大で約 30%削減できることがわかった。

以上(1)～(4)のとおり、本事業の目的・目標はほぼ当初の計画どおり遂行できたと思われる。

6-2 今後の取組み

人工関節鑄造部品の鑄造時制御冷却法による凝固組織制御技術の確立については、本研究で得られた熱交換器操業条件データを、現在製造している製品に応用していくこととする。客先承認が得られれば、HIP や熱処理を省略しコストダウンを順次行うこととする。またメタル-メタルインジェクションパーツについては客先より図面の開示があったので、今後は客先と連絡を密にしながら製品のサンプル出荷を順次行う予定である。鑄造返り材や鍛造端材については株式会社ヨネダアドキャスト製品溶解時に使用していく予定である。

人工関節鍛造部品用荒地材の鑄造凝固組織制御技術の開発については、基本的な鍛造方法が確立できたので、サンプル出荷を株式会社ヨネダアドキャストおよび浪速鍛工株式会社共同で客先に行く予定である。

仕上げ機械加工の高速化・高精度化のための表面加工技術の確立においては、まず、機械加工分野においては、膝関節部品の完成品のサンプル出荷を株式会社ヨネダアドキャストおよび株式会社石金精機共同でサンプル出荷を行う予定である。

電子ビームを用いた表面溶融による表面局部領域の組織制御技術の実用化にむけては、骨頭モデルの表面溶融実験時に、表面応力の影響かどうかは不明であるが、ひび割れのようなクラックが入る場合があった。この現象を解明するため、摩耗試験も含めて今後1年間の補完研究を行うことにする。

人工関節部品製造の低コスト化に対応するための材料リサイクルシステムの構築については、各社において適宜実行していくこととする。

今回の対象製品が医療分野ということで、色々な規格への適合性、色々な承認を取っていかなければ、事業化には結びつかないものもあり、そういったものにおいては事業化までには今しばらく時間がかかる。このサポインを機にお集まり頂いた研究機関の皆様のコンソーシアムの体制や、アドバイス頂いた先生方との体制を引き続き維持し、最後の事業化までコマを進めていきたい。

引用文献

1)S.Mineta, S.Namba, T.Yoneda, K.Ueda and T.Narushima : Metallurgical and materials transactions A 41 [8] (2010) pp.2129-2138.