

平成23年度 第3次補正予算事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「一般自動車用高品質耐食性マグネシウム鍛造ホイールの量産技術の開発」

## 研究開発成果等報告書概要版

平成24年12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

再委託先 更生会社ワシマイヤー株式会社

再委託先 富山県工業技術センター

この報告書には、委託業務の成果として、産業財産権等の対象となる技術情報（未出願又は未公開の産業財産権等又は未公開論文）、ノウハウ等の秘匿情報が含まれているので、通例の取扱いにおいて非公開とする。ただし、行政機関の保有する情報の公開に関する法律（平成11年法律第42号）に基づく情報開示請求の対象の文書となります。

## 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
- 1-3 成果概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

### 第2章 本論

- 2-1 均質で安定的な金属組織とするためのマグネシウム鍛造組織制御技術の開発
- 2-2 安定化鍛造形状の製造技術と適正外観品質の確保
- 2-3 耐食性マグネシウム表面処理技術の確立

### 第3章 全体総括

- 3-1 研究開発成果
- 3-2 研究開発後の課題・事業化展開



## 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) 地球温暖化の原因とされているCO<sub>2</sub>を削減することは、自動車業界において非常に大きなテーマになっている。ワシマイヤー社においても、軽量ホイールを提供し、車から排出されるCO<sub>2</sub>を削減することは、地球環境維持への貢献だけでなく、ワシマイヤー社の事業継続を図る上でも重要な意味を持っている。ワシマイヤー社は従来、鉄ホイールやアルミニウム鑄造ホイールよりはるかに軽量であるアルミニウム鍛造ホイールを世界の自動車メーカーおよびアフター市場に供給してきたが、さらなる軽量化を求めて、アルミニウムよりも35%も軽いマグネシウム鍛造ホイールを供給することが必要である。ワシマイヤー社はマグネシウム鍛造ホイールをF1レースに供給しているが、マグネシウムはアルミニウムと比較すると、

- 1) 材料コストが3~4倍
- 2) 塑性変形が可能になる条件の管理幅が狭い為、品質安定性が難しい
- 3) 塑性変形が可能になる条件の管理幅が狭い為、材料歩留まりが悪い
- 4) 耐食性が悪く、安全性・信頼性に欠ける
- 5) 現在の皮膜処理では、製品強度が落ちる

などの大きな欠点がある。そのため、マグネシウム鍛造ホイールを一般市場に提供することを断念してきた。しかしながら、昨今の経済情勢・社会情勢鑑み、ワシマイヤー社はマグネシウム鍛造ホイールを市場に提供することが使命であると理解することとなった。

(2) 研究目的を大きく分けると

1) 疲労強度を向上する

皮膜を施すと耐食性は向上するが、疲労強度が低下する。疲労強度をアップするためには材料結晶の微細化が必要になる。結晶の微細化は耐食性の向上にも寄与する。

2) 耐食性を向上する

耐食性を向上するための高性能の皮膜処理方法を開発すると同時に、鍛造時に使用する離型剤の残留が耐食性に影響を及ぼさないよう、離型剤を機械的に完全除去する。

3) 材料コスト・加工コストを低減する。

マグネシウムの軽量性や延性の悪さなどの特徴を理解し、金型方案、工程設計、製品設計を見直す。また、微細化するために必要となる工程数増加を極力抑える。

そのほか、切削にかかわる治具や刃具などの見直しとともに、切削条件などの見直しも行う。

(3) これらの目標としては、

1) 全部位の平均結晶粒径を、従来の30~80 μmを10~30 μmにする。

2) 機械的性質の引張強度を280~330MPa

機械的性質の耐力を180~210MPa

機械的性質のシャルピー値を5~9J/cm<sup>2</sup>

3) 皮膜処理方法の開発

皮膜処理後の材料強度が、ブランク材と比較し10%程度の低下にとどめる。

SST(塩水噴霧試験)1000時間において、腐食やフクレの程度を5mm以下にする。

4) 材料コスト

歩留まり20~40%を40~60%にする。

5) 加工コスト

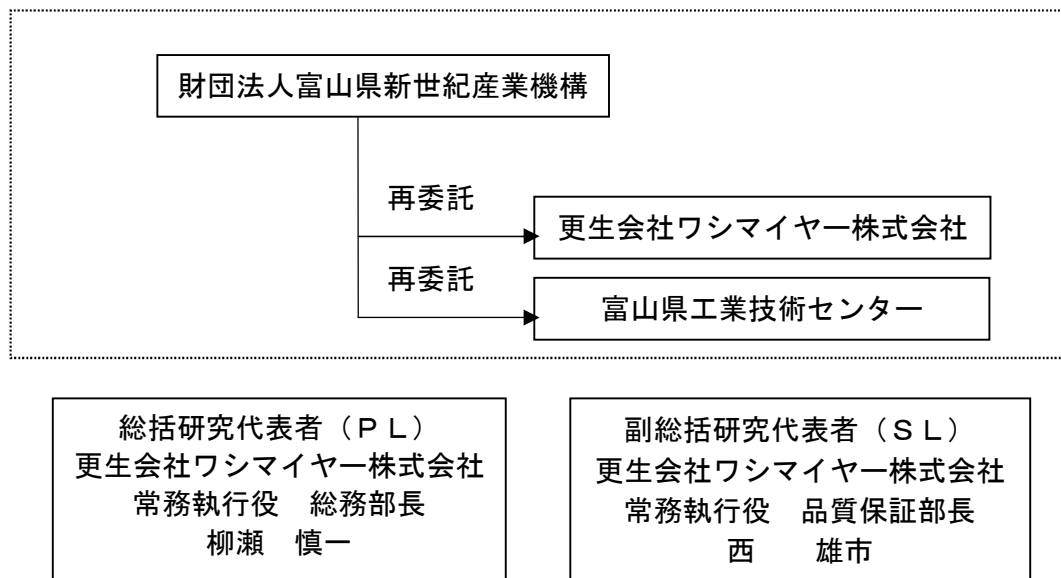
NC 旋盤加工時間を25分以内にする。

MC 加工時間を50分以内にする。

## 1-2 研究体制

### (1) 研究組織及び管理体制

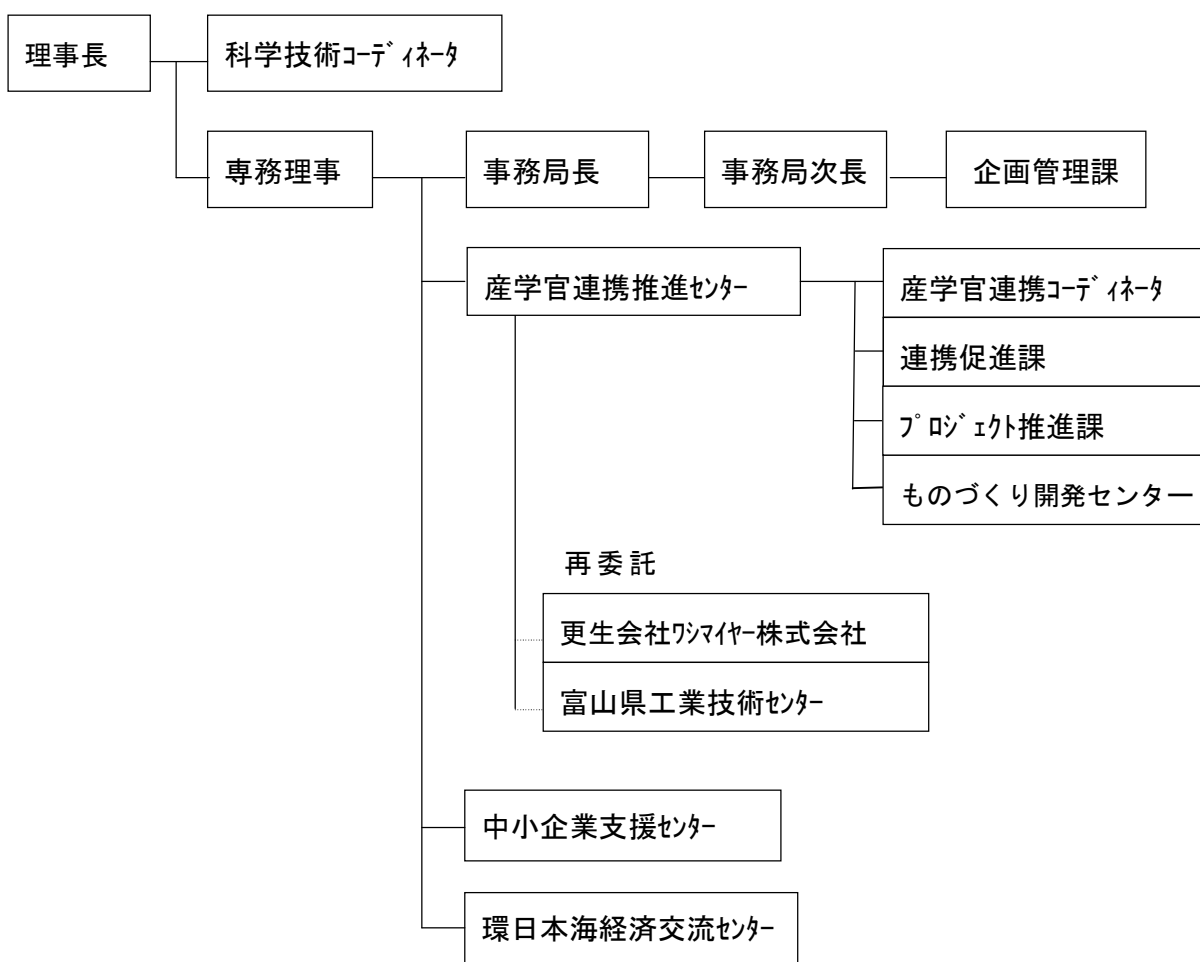
#### 1) 研究組織 (全体)



#### 2) 管理体制

##### ① 事業管理者

【財団法人富山県新世紀産業機構】

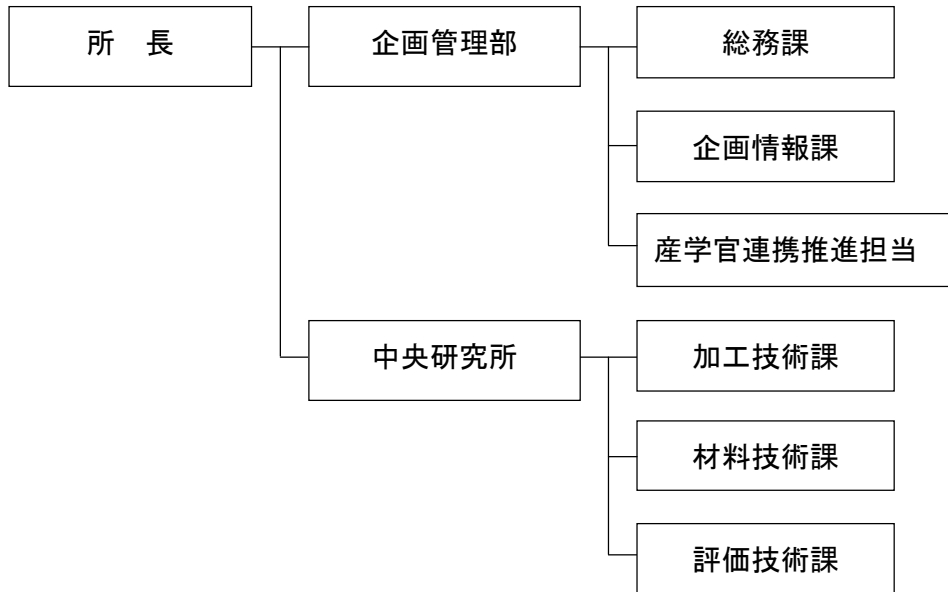


②（再委託先）

【更生会社ワシマイヤー株式会社】



【富山県工業技術センター】



(2) 研究者氏名

更生会社ワシマイヤー株式会社

氏名	所属・役職
柳瀬 慎一	常務執行役 総務部長
西 雄市	常務執行役 品質保証部長
竹原 豊	品質保証部 課長
曾根崎 陽	塗装技術開発部長
豊岡 保之	塗装技術開発部員
坂井 康樹	技術部員
泉田 佳徳	総務部 課長

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 課長
氷見 清和	中央研究所 評価技術課 主任研究員
柿内 茂樹	中央研究所 加工技術課 主任研究員
山崎 太郎	中央研究所 材料技術課 主任専門員

(3) 協力者

日本BBS株式会社 常務取締役 営業本部長 大西八郎



### 1-3 成果概要

#### (1)均質で安定的な金属組織とするためのマグネシウム鍛造組織制御技術の開発

少なくとも2方向からの複数回の鍛造加工と、ワーク温度及び加工速度を調整することにより、ホイールの全部位(スポーク、アウターフランジ、リム、インナーフランジ)において、平均結晶粒径を目標の10~30 $\mu\text{m}$ にすることができた。しかしながら、一部の部位の耐力やシャルピー値は目標に届かなかった。

- ① 引張強さは314~332MPa(目標 280~330MPa)と目標値を達成した。
- ② 耐力は161~206MPa(目標 180~210MPa)となり、スポーク部分を除いて、ほぼ目標に到達した。スポーク部分にはばらつきが見られる。
- ③ 伸びの目標設定はしていないが14.7~19.6%とアルミニウム合金並みを達成した。
- ④ シャルピー値は、4.2~6.0J/cm<sup>2</sup>(目標 5~9J/cm<sup>2</sup>)となり、目標値を達成する部位と未達の部位があった。

シャルピー値については、ばらつきがあるものの、ほぼ目標値を達成し、製品レベルの試験では良好な結果を示したため、耐衝撃性に関する理論的な考察が必要になった。そこで、材料試験や製品試験を繰り返し、実験データを積み上げると共に、文献調査を行い、ワシマイヤー社なりの理論構築を行った。

#### (2)安定化鍛造形状の製造技術と適正外観品質の確保

ディスク部分を単純なフラット形状にした場合は、動的再結晶が少なくなり、機械的性質や疲労強度はあまり向上しない。そこで、塑性変形が少しでも多くなるような金型形状および方案を検討した。金型改修や鍛造条件の変更により、問題となるような鍛造欠陥も防止することができた。そのため、最小限の素材で成形できるようになり、目標とする歩留まり率40%も達成することができた。また、歩留まり改善は、切削加工時間の短縮にも影響し、目標加工時間25分以内の達成にも寄与することができた。

#### (3)耐食性マグネシウム表面処理技術の確立

マグネシウムホイールの耐食性を強化するには、耐食性のある皮膜処理方法および、密着性を阻害する離型剤の完全除去が必要となる。

離型剤の完全除去を実現する為の切削加工はモデル形状ではあるが、目標の50分で加工完了することができた。機械加工であれば、欠陥確認の為の蛍光探傷作業も不要になり、人的生産性は3倍以上も向上することになる。更に機械加工は3交代が可能であるため、製造リードタイムの短縮も可能になる。

耐食性については、皮膜処理液の能力向上に加え、塗装方法の改善も行い、テストピース段階ではあるが、塩水噴霧1000時間試験に合格した。

皮膜処理後の疲労強度低下については、処理条件によりかなりの差が発生することが判明し、目標とする強度が安定的に確保できるよう、処理条件の確定を進めている。

#### 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

連絡担当者、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:柳瀬 慎一

組織名:更生会社ワシマイヤー株式会社

所属役職名:常務執行役 総務部長

TEL:0766-31-0021 FAX:0766-31-1403

e-mail : syanase@washibm.ono-group.co.jp

##### (3) 副総括研究代表者

氏名:西 雄市

組織名:更生会社ワシマイヤー株式会社

所属役職名:常務執行役 品質保証部長

TEL:0766-31-0021 FAX:0766-31-1403

e-mail : ynishi@washibm.ono-group.co.jp

##### (4) 研究実施者

機関名	代表者役職名	連絡先
更生会社ワシマイヤー株式会社	管財人 新保 克芳	〒933-0313 富山県高岡市福田六家525番地 連絡担当者:柳瀬 慎一 TEL:0766-31-0021 FAX:0766-31-1403 e-mail:syanase@washibm.ono-group.co.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番地 連絡担当者:富田 正吾 TEL:0766-21-2121 FAX:0766-21-2402 e-mail:tomida@itc.pref.toyama.jp

## 第2章 本論

### 2-1 均質で安定的な金属組織とするためのマグネシウム鍛造組織制御技術の開発

結晶粒径を細かくすれば、強度が向上するという事は、ホール・ペッチの法則として広く知られている。また、微細化の程度は、素材の結晶の大きさに加え、①大きい変形量、②速い変形速度、③低いワーク温度が重要である。更に、マグネシウムの結晶構造である稠密六方格子は複数のすべり面を持つが、常温においては、それぞれのすべり面がすべりを起こす臨界せん断応力は大きく異なる。そのため、1方向からの鍛造では、均一な結晶微細化ができないことも知られている。

ワシマイヤー社において、フェラーリ車をイメージしたホイールデザインを本研究用に新設計し、このモデルでの結晶微細化の研究を進めたところ、鍛造条件や鍛造方案の工夫を行うことで、目標とする最大結晶粒径 $30\mu\text{m}$ を達成することができた。

円筒形のビレットが、段階的な鍛造加工により数回の塑性変形を経てホイール形状になるが、部位により変形量が異なる為、各部位の結晶構造には違いが発生する。そのため、ホイール形状になった段階で、スポーク部、アウターフランジ部、リム部、インナーフランジ部から測定用のテストピースを、それぞれ3方向(直行座標でいうXYZの3方向)から切り出し、光学式顕微鏡により観察をした。その結果、全てのテストピースにおいて、粗大な結晶もなく、全体的に $30\mu\text{m}$ 以下の結晶が並んでいることが観察された。図の中の黒棒の長さは $50\mu\text{m}$ である。



図-1 スポーク部の結晶



図-2 アウターフランジ部の結晶



図-3 リム部の結晶



図-4 インナーフランジ部の結晶

さらに、富山県工業技術センターにおいて、EBSDによる結晶方位角5度を基準の測定および粒度分布の解析を行った結果、平均結晶粒径は、スポーク部は12.1  $\mu\text{m}$ 、アウターフランジ部は7.9  $\mu\text{m}$ 、リム部は9.1  $\mu\text{m}$ 、インナーフランジ部は9.2  $\mu\text{m}$ であることが判明した。

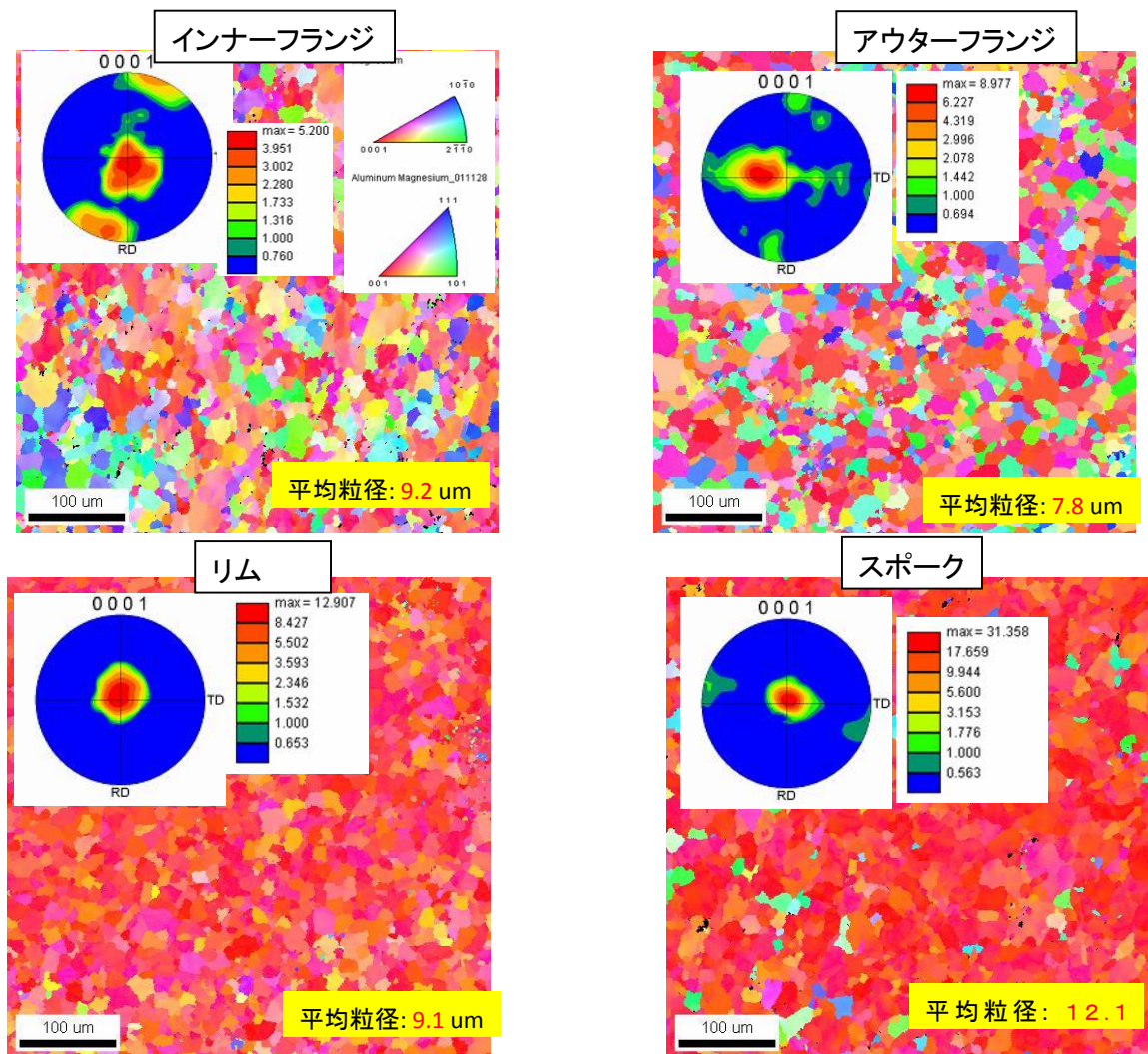


図-5 EBSDによる方位解析と粒度分析

赤色部分は、マグネシウムの結晶構造の六角底面を表している。スポーク部は赤色が強く現れているが、これは、双晶変形の影響が強く現れていると考えている。アウターフランジ部およびインナーフランジ部はさまざまな色が全体的に均一に分布している。これは、塑性変形による再結晶挙動の結果と考えられる。リム部分も、赤色が強く現れているが、これはリム部分を成形するスピニング加工に起因する集合組織と判断している。

スポーク部分のテストピースを透過型電子顕微鏡(TEM)でナノレベルの観察を行ったところ、強加工により導入された転位、双晶変形、又微細に分解された金属間化合物などが見られた。



図-6 TEMによるナノレベルの結晶状態の測定図

機械的性質に関しても、各部位ごとに引張強度、耐力、シャルピー値の測定を行った。引張強度は、各部位とも目標値に到達し、314MPa~332MPaとなった。耐力は、スポーク部において161MPaと目標値を下回るテストピースもあったが、残りの部位は、194MPa~206MPaとなった。スポーク部が他の部位よりも耐力値が劣る理由としては、先に記述したように双晶変形の割合が多いことによると考えられる。シャルピー値については、リム部は6J/cm<sup>2</sup>となったものの、その他の部位では、4.2J/cm<sup>2</sup>~4.8J/cm<sup>2</sup>と目標値を下回った。シャルピー値は韌性を表す指標であるが、製品レベルで行う13度衝撃試験は合格となった。比較用に、本研究金型を使用してはいるが、異なる鍛造方案で行った製品では、シャルピー値は高いものの、製品レベルでの13度衝撃試験は不合格となった。材料試験と製品試験では異なる結果が発生し、シャルピー値の指標としての有意性に疑問を感じたため、材料試験や製品試験を繰り返し、実験データを積み重ねると共に、文献等の調査を行い、韌性の程度を見極める理論的構築に取り組んだ。また、富山県工業技術センターのシャルピー試験機の問題もあるため、あくまで参考値としてのみ把握することとした。また、ホイールの性能試験には、耐久性を見るための半径方向負荷耐久試験および運転時のコーナリングによるスポーク部分の耐性を見るための回転曲げ疲労試験があるが、本研究品は、いずれも試験基準を大きく上回る結果となった。

## 2-2 安定化鍛造形状の製造技術と適正外観品質の確保

結晶を微細化する重要な要素として、①大きい変形量、②速い変形速度、③低いワーク温度をあげたが、この要素は鍛造欠陥を作り出す要因ともなる。結晶微細化は、鍛造欠陥の防止と

トレードオフの関係にある。

そのため、結晶微細化の目標としている $30\mu\text{m}$ レベルを達成できる鍛造条件の見極めが必要とされた。鍛造方案としては、2つの段階を設定した。1段階目は結晶を、ある程度微細化する段階であり、2段階目は最終的な結晶微細化と素材成形を行う段階である。

1段階目の結晶微細化段階においては、シミュレーションソフトによる解析を行ったものの、従来方案からは、非常にかけ離れた設計であったため、既存のデータでは間に合わず、解析上は問題がないものの、実際の試作においては、鍛造欠陥防止の為に金型改修を何回も繰り返した。この繰り返しにより収集されたデータは、今後の貴重な基礎データになると考えている。

また、最終鍛造による素材成形は従来方案と異なり、緩やかな勾配、段差の少ない凹凸とした為、いろいろな鍛造欠陥(しわ疵、かぶさり疵、ひけ、かじり、欠肉など)を緩和することができ、従来方案での鍛造欠陥の発生を見越した捨て加工用のボリュームを減らすことができた。更に鍛造後に行うスピニング工程の加工方法を見直すことにより、加工ひけ(加工に伴い、素材が特定の方向に引き寄せられる現象)への対応も可能になり、この分のボリュームも削減することができた。これにより、製品重量8Kg に対し、素材重量は20Kg となり、材料歩留まりは40%を達成することができた。

更に、従来の素材形状、加工方案では、鍛造中に発生する鍛造上下型のズレ(鍛造型クリアランスはあまり大きくはないが、加工上は問題となる場合もある)、熱処理歪、スピニング加工による強加工歪、およびスピニング加工の形状不安定などが発生していたが、本研究において熱処理条件の見直しやスピニング加工方法の見直しにより、形状の不安定さが大幅に緩和され、その結果、安定的な形状を持つ製品が後工程であるNC旋盤加工に送られることになった。形状が不安定な状態であれば、圧肉の部分や薄肉の部分が発生し、NC旋盤加工の画一的なプログラムで切削する場合には、その都度切削量に変化することになる。切削量が多い場合には、加工ツールの破損やズレにより、加工不良が発生することになり、加工ツールの保護や寸法安定性を狙うことが必要になる。そのため、製品により無駄になることは分かっているが、万をを考えて、エアーカットとなる加工プログラムを作らざるを得なくなる。本研究においては、素材設計や加工方案の工夫により、形状が安定した為、これらのエアーカット部分を削除することができ、更に上記の鍛造欠陥やスピニング時に発生する加工引け対策としての余分なボリュームも減らすことができたため、NC旋盤に必要となる加工時間は目標を大幅に上回るすることができた。更に、形状が不安定な場合は、加工後に削り残し(黒皮状態)が発生する場合もあり、指定公差の範囲内で追加工をすることもあったが、本研究においては、そのような修正加工が発生することはなかった。また、加工後の製品の確認時間も、多少ではあるが、短縮されることになった。そのほか、従来は、ロットが変わると形状に合わせた加工プログラムを作成するケースもあったが、本研究においては、数回のロット加工を行ったが、そのような状況は一度も発生しなかった。これらの改善効果も評価できるものとなった。目標加工時間25分に対し、18分での加工が可能となっている。

## 2-3 耐食性マグネシウム表面処理技術の確立

### (1) マシニングセンターによるホイールの全面切削加工条件の開発

本研究のモデルデザインは、切削を前提にしており、その加工方法を考慮した設計となった。設計的には、テーパ一部分の角度を統一することにより加工刃具は荒削り用と仕上げ用の2本とし、意匠面はR形状ではなくC面形状とした。その結果、加工刃具は最小限の3本となり、ツール交換を少なくすることによるツール交換時間の削減も図った。

加工刃具の選定は、高速切削時に発生するビブりを防止する為、①刃長は極力短くすること、②刃具直径は最大限大きくすること、③ねじれ溝は、切粉の排出問題が発生しない程度に小さくすること、④シャンク径を太くすること、⑤ホルダーは焼きばめ、2面拘束とした。更に切削性や夜間のトラブル防止を考え、水溶性切削液を使用し、濃度は通常使用の1.5倍とした。



図-7 刃具形状の例

加工プログラムは3次元CAMにおいて自動作成した。しかし、このプログラムはそのまま使用すると、隅部やR部の寸法や表面形状の不均一が発生するだけでなく、刃具の破損という問題も発生しやすくなるため、問題が発生しない程度に、加工条件を手作業で修正した。更に自動プログラムはエアーカットといわれる無駄な加工経路も組み込まれることが多く、この部分も手作業で削除した。

加工条件は、機械の最高能力を考慮しながら、加工刃具の破損のない範囲の最高条件になるように考えた。この結果、数百本のテスト加工を行ったが、刃具の破損は発生しなかった。

加工時間は目標の50分を下回る48分となり、意匠形状にあまりこだわらない普及タイプの製品であれば、加工コスト面での対応も可能であることが判明した。

加工条件については、更に刃具の耐久性や切削性能を見極めながら、検討する予定である。

## (2) 耐食性表面処理の試験・評価

5%以上のアルミニウムが添加されているマグネシウム合金は、通常の雰囲気下においては、腐食は殆ど進行しないが、酸性の雰囲気や塩水の環境では、腐食の進行が見られる。そのため、一般に普及するには、耐食性の高い皮膜処理が必要になる。また、皮膜処理を行うと疲労強度が低下するため、疲労強度の低下が少ないことも条件になる。

試験項目としては、アルミニウムホイールと同レベルの耐食性を目標に、一次密着、二次密着、塩水噴霧試験1000時間としたが、1000時間の試験では結果がわかるまでに日数がかかりすぎる為、欧米で主流となっているCASS試験240時間での先行試験を進めた。

(CASS試験は酸性環境下であるため、塩水噴霧試験の数倍過酷な試験である。)

また、皮膜処理による疲労強度の低下が考えられる為、回転曲げ疲労試験も実施した。

皮膜処理に関して4社の処理技術を比較検討した結果、2種類の皮膜処理方法が、板TPLレベルにおいて一次密着、二次密着、CASSと数回にわたり試験合格となった。更に、ブロック片(ホイール形状の一部を切り取り、製品形状に近いもの)でのテストを行った結果、非常に良好なものであった。

A皮膜処理は、

**【一次密着試験】**

一次密着試験は、塗装後24時間を経過したあと、2mm 間隔の基盤目をカッターナイフで100 柵作り、その上にテープを密着させ、一気にテープを引き剥がし、塗装の剥がれ具合を調査するものである。

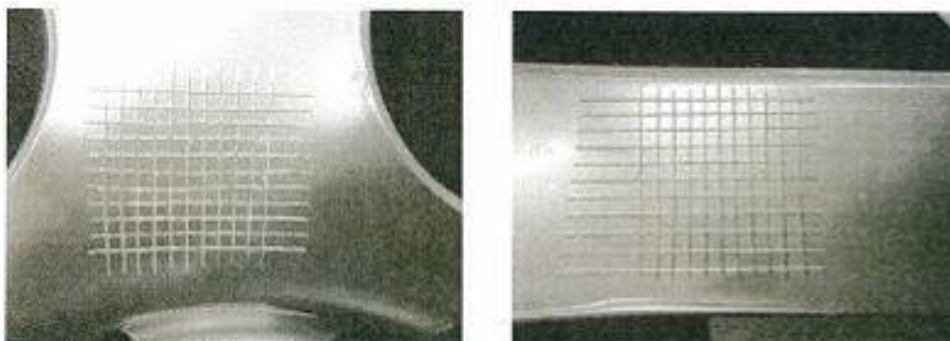


図-8 一次密着試験結果

**【二次密着試験】**

二次密着試験は一定条件の温水に一定時間浸した後、一次試験と同様の試験を行うものである。

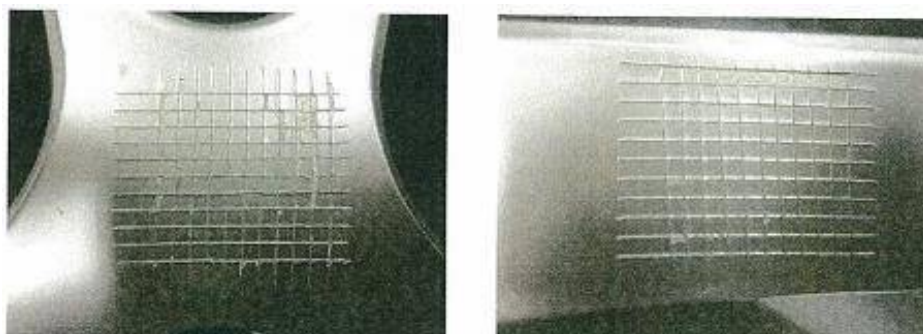


図-9 二次密着試験結果

**【CASS試験】**

CASS試験は、欧米で主流となっている試験方法で、カッターナイフで70～80mm のクロスカットを、生地には到達するまで切込みを入れた後、pHが3. 1～4. 0程度の50℃噴霧液に240時間暴露し、その切り込みからの腐食やフクレの量を測定するものである。

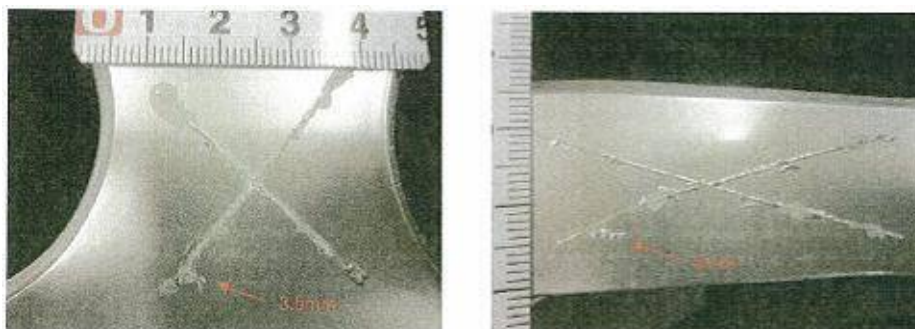


図-10 CASS240時間試験



### 【SST試験】

SST試験方法はCASSと同じであるが、pHが中性であることと、温度条件が35℃となっている

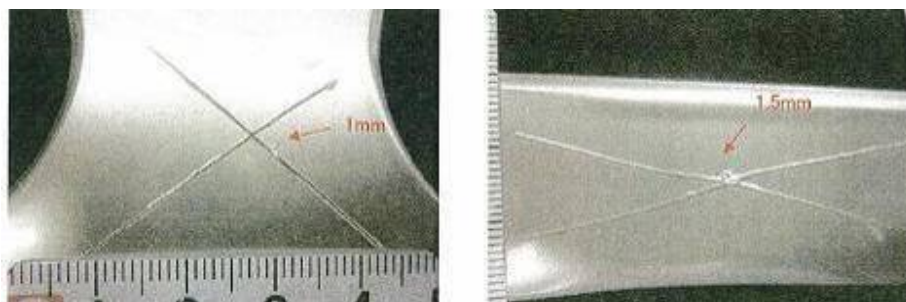


図-11 SST1000時間試験結果

この時点でのA表面処理については、

- ① 耐食性能は優れている。
- ② 疲労強度が向上した。  
理由は不明。  
再現テストでの確認が必要。
- ③ 管理の手間が多い。
- ④ 廃棄物が多い。
- ⑤ 処理時間が長い。
- ⑥ 工程数が多い。  
内製化のためのイニシャルコストはB社より高くなる。
- ⑦ 加温、液の更新などのランニングコストが大きい。

引き続きホイールでの試験を行っている。

B表面処理においても、板TPIレベルでの一次密着、二次密着、CASSと数回にわたり試験合格となった。ただ、A表面処理に比較すると、若干バラツキが大きい為、工程変更も併せて検討している。

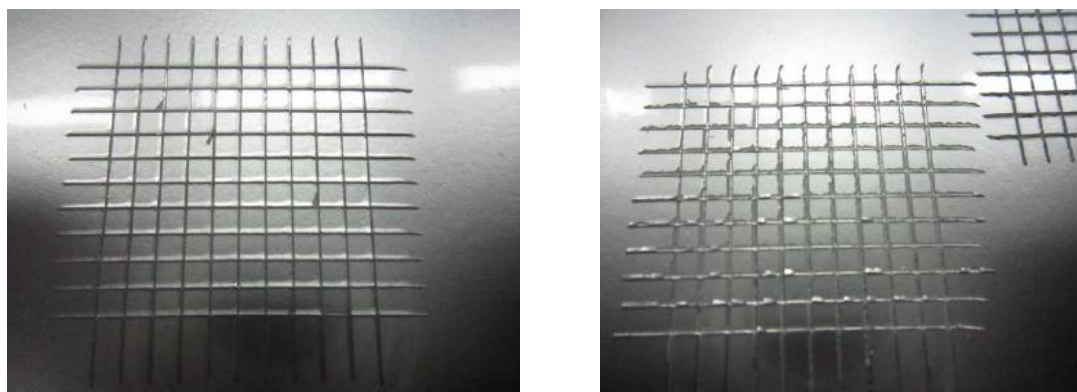


図-12 板テストピースの二次密着試験結果(右図は工程変更後)

ブロック品による結果が合格レベルには達していない。又、工程変更したものが悪くなっている。

板テストピースと、ブロック品の処理方法の差も含めて、原因の究明中である。

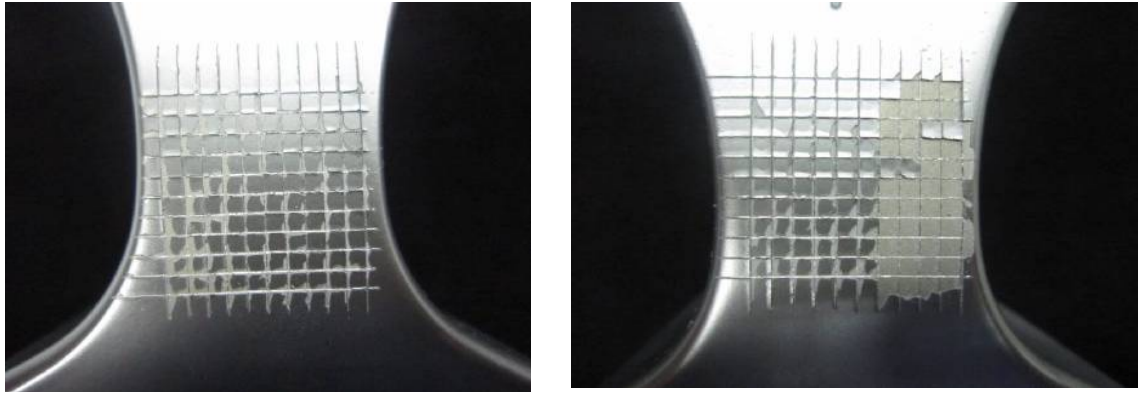


図-13 ブロック品の二次密着試験結果(右図は工程変更後)

CASS試験は板テストピース、ブロック品いずれも、合格レベルに達している。工程変更の効果は見られない。更に工程変更品に小さなブツが多量に発生した。この点は検討課題である。

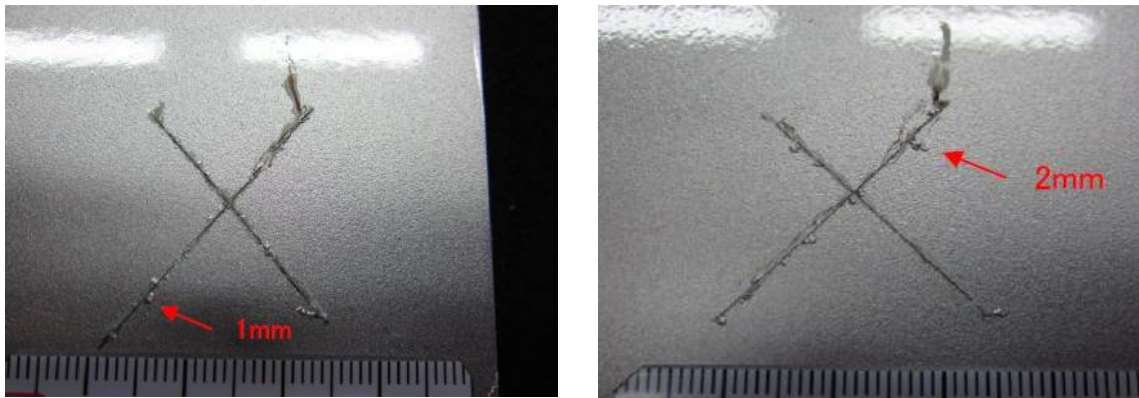


図-14 板テストピースのCASS試験結果(右図は工程変更後)

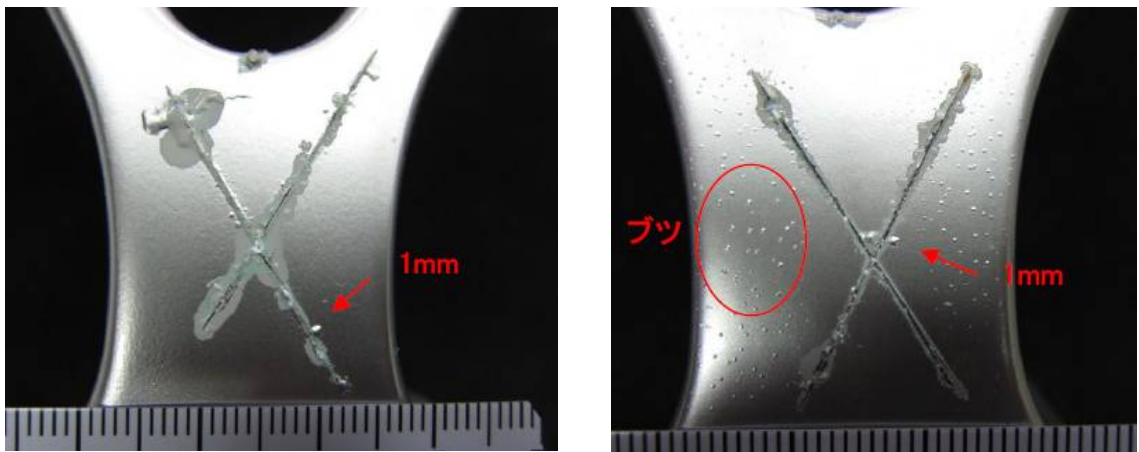


図-15 ブロック品のCASS試験結果(右図は工程変更後)

この皮膜液処理を行った回転曲げ疲労試験において、皮膜処理品の疲労強度が、ブランク材

に対し、20%程度低下した。荷重が10N(ニュートン)単位のため、2桁レベルの疲労限界では1段階変えるだけで、20%ぐらいの変動が発生する。この皮膜処理品に塗装を施すと、ブランク材レベルの強度に回復した。

回復する理由としては、防湿効果の要因もあるそうだが、皮膜処理により荒れた表面が、塗装を施すことにより表面の凹凸が解消され、応力集中を抑制することと、僅かながらも塗装による圧縮効果が働くからではないかと考えている。

この時点でのB表面処理は、

- ① 耐食性能はA社より劣る。
- ② 管理の手間がかからない。
- ③ 廃棄物はA社よりも少ない。
- ④ 処理時間はA社よりも短い。
- ⑤ 工程数はA社よりも少ない。  
内製化のイニシャルコストはAよりも少ない。
- ⑥ 加温等のランニングコストはAより少ない。
- ⑦ 疲労限界は20%程度低下するが、塗装によりブランク材程度に回復する。

### 第3章 全体総括

#### 3-1 研究開発成果

車社会は、CO<sub>2</sub>の排出削減による地球温暖化防止あるいは資源の枯渇対策としての省資源が喫緊の課題とされている。ホイール業界において、ワシマイヤー社が占める市場シェアは0.5%程度ときわめて小さいものの、BBSブランドを有し、アルミニウム鍛造ホイールという極めて特殊な製法で、ホイール業界のトップブランドとなっている。その中で、同社は、車社会のCO<sub>2</sub>の削減、省エネルギーの要請に呼応し、F1レーシングで築きあげたマグネシウム鍛造技術を活用し、アルミニウムよりも比強度に優れたマグネシウム鍛造合金による一般自動車用マグネシウムホイールの開発に着手した。軽量ホイールは操縦の安定性に好影響を与えるだけでなく、車のバネ下重量1Kgはバネ上重量の10Kgに匹敵するといわれている。

ただ、レース用ホイールは、レースにのみ使用し、長期にわたる耐久性を要求されることがないが、一般自動車用マグネシウムホイールには、軽量だけではなく、長期にわたる耐久性を確保する為の素材設計や製品設計、耐食性皮膜の開発が必要であった。

研究の方向は、結晶を微細化することにより、より強度の高いホイールを作る。そのための鍛造技術を開発する。及び耐食性に優れた皮膜を開発することとした。

また、ワシマイヤー社の研究体制は、技術部門、品質保証部門、製造部門、設備関連部門など全社的なものとなり、富山県工業技術センターにおいても、詳細な観察や測定およびアドバイスをするための体制を構築することとなった。

##### 1) 均質で安定的な金属組織とするためのマグネシウム鍛造組織制御技術の開発

結晶組織を微細にするには、大きな変形量、速い変形速度、低いワーク温度が有利であるが、これらは鍛造欠陥の要因にもなるものである。又、マグネシウムの結晶構造からは、1方向からのみの鍛造では、均一な結晶組織にならないため、どのような方で進めるかが重要課題であった。当初に作り上げた方案では、材料歩留まりは10数パーセント、鍛造工程のみならず、切削工程も含み、主要工程だけでも10工程近くに上った。しかしながら、時間と手間を掛けても、50 $\mu$ m程度にはなるものの、それを下回することは殆どない状態であった。そこで、思い切った工程短縮で望んだ所、結晶粒径が大きい部分と小さな部分の2つに分かれることがわかった。更に、結晶粒径が大きい所は、特定の箇所であることも判明した。この時点で、鍛造条件や鍛造方案を再設計した結果、目標とする結晶粒径を得ることができた。更に数回の量産確認を行い、同様の結果になることも判明した。

この時点で、機械的性質を調査したところ、引張強度は目標値に達し、同時に測定している伸びも予想を上回る数値を記録した。しかしながら、耐力やシャルピーは部位によっては目標に届かないケースが発生した。

シャルピー値は従来あまり重視していない特性値であったが、マグネシウムの場合は衝撃性も重要な要素である為、本研究において初めて取り入れた特性値である。ところが、研究の過程の中で、シャルピー値の高い製品が必ずしも耐衝撃性に優れていないことが判明した。そのため、実験を繰り返し、データを収集し、文献を調査したところ、数値的な表現はできないものの、一応、この逆転現象を理解できるようにはなった。

また、現測定方法によるシャルピー値は参考程度にすることとした。

従来の研究においては理論化という点が十分に確立できず、技術の進歩はそこで止まってしまう傾向があったが、今回、ワシマイヤー社と富山県工業技術センターとの共同研究により、十分とはいえないまでも、一定の理論構築が出来上がった。また、多くの研究員が、これらの技術情報を理解しており、ワシマイヤー社におけるマグネシウム鍛造技術の一段のレベル向上に寄与した。

## 2) 安定化鍛造形状の製造技術と適正外観品質の確保

鍛造欠陥を防止するには、少ない変形量、ゆっくりした変形速度、高いワーク温度が必要であるが、この条件は、結晶微細化とは逆の方向になる。そのため、鍛造の段階ごとに、どの要素を重視するかが必要になった。

本研究においては、ある程度の結晶微細化にいたる段階と目標とする結晶粒径にいたる段階に区分した。目標とする結晶粒径は素材の最終成形と同じ工程で実現を図り、それぞれの段階において、鍛造欠陥が発生しない方案及び鍛造条件を確立した。

最初の段階においては、シミュレーションソフトを活用し、鍛造欠陥の抑制を図ったが、従来とは大幅に異なる方案であった為、従来の基礎的データだけでは十分なものではなく、実際の試作において、数回の金型改修を行った。その結果、鍛造欠陥を克服することができた。

この鍛造欠陥抑制は、材料歩留まりにも大きく影響し、従来、欠陥が発生するためやむなく増肉していた部分を削除することも可能になった。そしてこのことが、切削加工における大きな時間短縮につながった。一つの改善が、次の改善、更に次の改善と相乗的な効果の連鎖ができあがった。

## 3) 耐食性マグネシウム表面処理技術の確立

当初に設定した耐食性の指標は塩水噴霧1000時間試験によるものであり、合否判定基準は、切り欠きからのふくれやさびの大きさが5mm 以内という非常にゆるい基準であった。このことから、マグネシウム皮膜の耐食性向上が非常に難しい技術であることも推察される。しかしながらBBSブランドを有し、カーメーカーへの提供を考えた場合は、このレベルでは市場に提供できるものではない。そこで、アルミニウムホイールと同レベルの2次密着性能およびCASS240時間試験においても塩水噴霧1000時間程度の腐食やさびにとどまることを目標として設定した。

4種類の表面処理方法について検討した結果、2種類の方法については、実用レベルには達していないが、数回行ったテストピースレベルでの試験では合格しているため、もう一歩の所に来ていると考えている。

また、皮膜処理方法の選定基準のひとつに、皮膜処理後の疲労強度低下がblank材の疲労強度の10%程度にとどまるという目標設定がある。しかしながら、荷重が10N単位であるため、1段階違うと10~20%の低下となって現れる。

現時点で継続調査を行っている皮膜処理方法では、10数%ほど低下するものの、塗装後にはblank材レベルの疲労強度に戻るものもあり、もう一社のものは、まだ再現実績はないが、逆に疲労強度が向上したものもある。この面でも、一層の研究が必要になる。

また、耐食性能を向上させるには、鍛造時に使用する離型剤を完全に除去する必要があるが、手作業による除去では、手間がかかるだけでなく、信頼性も乏しいものがある。そこで、本研究においては、全面切削加工を行うこととした。切削加工自体は難しいものではないが、問題は加工時間である。本研究用モデルが前提ではあるが、製品設計と工程設計を並行的に検討することで、シンプルな加工形状、最小限のツール本数を実現し、また3DCAMで作製した加工プログラムについても、問題箇所と思えるR部や隅部の加工条件を手作業により変更した。その結果、目標とする50分以内に到達した。ワーク脱着時間は15分足らずであり、機械化することにより、人的生産性は約3倍も向上することとなった。更に機械加工であれば、3交代による稼働も可能になり、リードタイムの短縮にも繋がることになる。

### 3-2 研究開発後の課題・事業化展開

#### 1) 今後の課題

##### ① 鍛造作業の安全対策

鍛造時のワークハンドリングにおいてプレス下に入っの手作業が必要になる。治具あるいは金型等の工夫により、オペレーターの手作業を解消する。或いは、鍛造方案のもう一段の工夫が必要になる。

##### ② 結晶粒径の平均化

本研究の結果、平均結晶粒径はスポーク部で12 $\mu\text{m}$ 程度と非常に小さくなっているが、一部には30 $\mu\text{m}$ 程度の結晶も存在する。30 $\mu\text{m}$ レベルの結晶が20 $\mu\text{m}$ 程度になった時には、機械的性質や疲労強度の一段の向上、あるいは信頼性が向上する可能性がある。

##### ③ 皮膜品質の安定化の確認

テストピースレベルでは一応合格レベルに達しているものの、ホイールレベルでの品質確認が未実施となっている。また、処理条件の限界確認も未実施である。

製造リードタイムの短縮および製造コストを削減するには、内製化が必須であるため、皮膜処理設備の導入も課題である。

#### 2) 事業化展開

ワシマイヤー社では、本研究の成果であるマグネシウム鍛造ムホイールを、当初は平成24年中、或いは25年の春の市場化を想定していたが、製品品質の安定性を確認する為には、一段の研究が必要と判断した。品質の安定性を確保する為、製造条件の適切性や管理幅などの確認を含めた補完研究を25年9月まで継続し、製品発売を10月とした。

対応車種は、ポルシェ、GTR、レクサスなどの高級スポーツカー或いは高級セダンを想定している。また、カラーバリエーションは2~3種類必要とも考えている。

表-1 事業化スケジュール

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10	11	12	
課題解決	→												
製品設計			→										
金型製作				→									
試作加工					→								
製品評価						→							
サンプル製作							→						
サンプル紹介								→					
発売										→			