

# 二輪車アルミフレーム用鋳造合金の開発

Development of Aluminum Casting Alloys for Motorcycle Frames

高 崎 憲 政\* 小 屋 栄太郎\* 望 月 信 介\*  
Norimasa Takasaki Eitaro Koya Shinsuke Mochizuki

## 要 旨

二輪車のフレームは軽量、高剛性である事が求められており、スチールからアルミへと材料置換が進められている。

アルミフレームにおいては、剛性と生産性の面から鋳造部品が多用されているが、フレーム用鋳造合金は強度、靱性、鋳造性以外に溶接性、溶接部強度、アルマイト性等の特性を満足する必要がある。

これに対し溶接部強度が高くアルマイト性に優れるAl-Zn-Mg系合金と鋳造性とアルマイト性のバランスを取ったAl-Si-Mg系合金の2種のアルミ合金を開発し、フレーム形式の要求特性に合わせて使い分けている。本稿ではこれらの材料特性について述べる。

## ABSTRACT

The requirements for lightweight and high-rigidity motorcycle frame involves substituting aluminum for steel. As the material commonly used due to its rigidity and productivity in the aluminum frame, casting alloy must meet requirements for weldability, strength of weld zone and anodic oxide film as well as strength, toughness and castability.

This paper presents material properties of the two alloys developed for use in the aluminum frame: Al-Zn-Mg alloy that has high strength of weld zone and good coloring characteristics of anodic oxide film; and Al-Si-Mg alloy that has high castability and still achieves good coloring of anodic oxide film. These two alloys are effectively used in parts of the frame according to their material properties.

## 1. ま え が き

オンロード用二輪車の動力性能の向上に伴い走行安定性の向上を計る為に、フレームには増々高剛性かつ軽量であることが求められている。

従来のフレームはスチールパイプ及び板材を溶接により結合して製造されてきたが、材料の弾性率が高い為、剛性上の問題よりも主に溶接部の疲労強度上の問題から軽量化が限界となっていた。この為、より比重の軽いアルミへの材料置換が検討されるようになった。

アルミは、鉄に対して比重は約 1/3 であるが弾

性率も約 1/3 であり、高剛性を要求されるオンロード用二輪車のフレームに対しては、単純な材料の置き換えでは十分な軽量化は望めない。一般的に弾性率の低い材料で高剛性を得るには、構造体の表面積を大きく取り、パイプ継手部分の断面形状を発生モーメントに対応して連続的に変化させる必要がある。

この様な点からアルミフレームの量産化にあたっては、押出型材パイプと鋳造一体成形ジョイント部を熔接結合する事により、軽量、高剛性かつ生産性の高いアルミフレームの実用化に成功し

\* 朝霞研究所

ている。

しかしながら、ジョイント部は強度、靱性、溶接性、溶接部強度、アルマイト性、鋳造性等の特性をすべて満足しなければならず、溶接構造物への鋳造部品の適用は困難とされ<sup>(1)</sup>、上記特性を満足する新鋳造合金の開発が行われた。本稿では新たに開発した合金の開発経過を通してそれぞれの合金の特色を明らかにする。

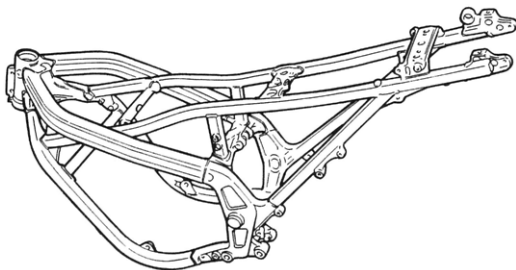
## 2. フレーム形式と材料

アルミフレームの形式例を図1に示し、各部の材質と製法を表1に示す。

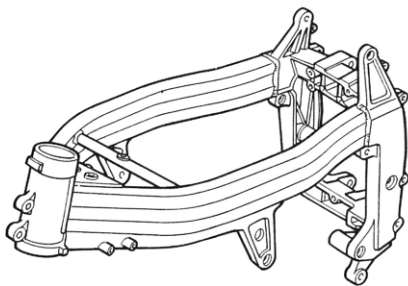
スチールフレームに対しアルミフレームでは、ダブルクレードルタイプで約25%、ツインチューブタイプで約40%の軽量化が計られている。

フレーム形式によって2種類の鋳造用合金が使われているが、これは以下の理由による。

従来のスチールフレームにおいて、軽量高剛性化にはダブルクレードルタイプが適するとされ、初期のアルミフレームにもこのタイプが導入された。ダブルクレードルタイプは弾性率の高い材料を主体に考えられている為、細径のパイプが主体となり、溶接部が比較的複雑で溶接部に応力が



ダブルクレードルタイプ



ツインチューブタイプ

図1 各種フレーム形式

表1 フレーム形式と材質

| フレーム形式      | パイプ               |          | 鋳物         |                  |
|-------------|-------------------|----------|------------|------------------|
|             | 製法                | 材質       | 製法         | 材質               |
| ダブルクレードルタイプ | 押出<br>シングル<br>ホロー | A7003-T4 | 重力金型<br>鋳造 | 6%Zn-<br>0.71%Mg |
| ツインチューブタイプ  | 押出<br>トリプル<br>ホロー | A7003-T4 | 重力金型<br>鋳造 | 5%Si-<br>0.30%Mg |

集中し易くなる傾向がある。この為、溶接部強度を重視し、パイプと鋳造部品の両方にAl-Zn-Mg系合金を採用した。

その後アルミ合金の材料特性にあったツインチューブタイプのフレームが考案され、更に軽量、高剛性化が進められた。ツインチューブタイプの特徴は、パイプを2本の幅広い高剛性のパイプに集中化し、ジョイント部の断面形状を連続して変化させていることにある。これにより溶接箇所が単純され、かつパイプとジョイント部品との継手面が広くとれる為溶接部に対する応力の集中は少なくなる。しかし、鋳造部品にはより複雑、大型化が必要になり溶接部強度よりはむしろ鋳造性を重視したAl-Si-Mg系合金を採用した。

## 3. フレーム材料設計の考え方

二輪車フレーム用鋳造合金に要求される特性をまとめると以下ようになる。

- ①溶接性…割れ感受性が低いこと。
- ②強度…駆動力・路面からの反力・エンジン振動等の繰り返し荷重に対して十分な強度を有すること。
- ③靱性…転倒・衝突に対して耐衝撃性を有すること。
- ④アルマイト性…アルミ特有の金属光沢感と明度が維持されること。
- ⑤鋳造性…薄肉、複雑形状部品に対応可能であること。

上記の特性に対して溶接性及び靱性から、材料系Al-Zn-Mg系、Al-Si-Mg系及びAl-Mg系合金が選定される。この3種類の材料の特性比較を表2に示す。

Al-Zn-Mg系とAl-Si-Mg系は熱処理型である為、

表2 Al フレーム用鋳物材料の特性比較

|           | 母材<br>強度 | 溶接部<br>強度 | 鋳造性 | アルマイト性 |
|-----------|----------|-----------|-----|--------|
| Al-Zn-Mg系 | 良        | 優         | 可   | 優      |
| Al-Mg系    | 可        | 可         | 可   | 良      |
| Al-Si-Mg系 | 良        | 可         | 優   | 可      |

時効硬化によって母材の強度向上が可能であり、Al-Zn-Mg 系合金は常温で時効硬化する為、溶接熱影響部の強度が回復する特性を持つ。

また、アルマイト性については Al-Si-Mg 系は共晶 Si の晶出により色調が灰色化し光沢が低下する傾向を持つ。

一方、鋳造性のなかで流動性は、Si 量が亜共晶組成 (~11.2%) までは Si 量が多いほど向上するが、Si を含有しない Al-Zn-Mg 系と Al-Mg 系はあまり良くない。また、Al-Zn-Mg 系合金は熱間割れの感受性が高い為、金型による大量生産の例は稀である。Al-Mg 系は引け特性が悪くシュリンケージが発生し易く溶接ビードの品質を低下させることがある<sup>(2)</sup>。

従って、フレーム用鋳造合金の開発には鋳造性と溶接部強度及びアルマイト性とのバランスの取り方が重要になってくる。

アルミフレームの導入経緯をみると、初期段階において、オールアルミ展伸材フレームと同等の溶接部の信頼性及び外観商品性を得る為に Al-Zn-Mg 系合金を採用した。この系の合金が持つ鋳造の困難さを克服し鋳物ジョイント構造が確立された。アルミフレームの評価確立後は、商品魅力のポイントは形状の独自性に移行し、これに伴い鋳造部品に対しては大型化(製品重量 1.0~1.5 kg → 2.0~4.0 kg)及び複雑化・薄肉化(標準肉厚 5.0 mm → 3.5 mm)・中空化が進められた。これらの要求に対して鋳造性を重視した Al-Si-Mg 系合金の開発により鋳造ジョイント構造のアルミフレームが中・大型オンロードスポーツ車に広く使用できるようになった。

## 4. Al-Zn-Mg 系合金の開発

### 4.1. 化学成分

Al-Zn-Mg 系開発合金の化学組成を表3に示す。

表3 Al-Zn-Mg 系合金の化学組成 (Wt%)

| Zn  | Mg   | Fe  | Mn  | Cr  | Ti  | Al  |
|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 5.5 | 0.55 | 0.6 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | bal |
| 5   | 5    | 5   | 5   | 5   | 5   |     |
| 6.5 | 0.75 | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.2 |     |

主成分の Zn・Mg 量は鋳造特性、耐応力腐食割れ性及びパイプとの色調のマッチングから決定した。また熱間割れの感受性を低下するために Fe、Ti を添加し、耐応力腐食割れ性向上のために Cr、Mn を添加している。

### 4.2. 鋳造特性

図2に主な Al-Zn-Mg 系、Al-Mg 系合金の組成範囲を示す。Al-Zn-Mg 系合金では、Zn7%、Mg 0.5~1.0% に熱間割れ感受性のピークがあり、低 Zn 高 Mg 側に行くに従い熱間割れ感受性は低下する<sup>(3)</sup>。また、Mg5% 合金ではシュリンケージが起こりやすく、また流動性が良くない為 Al-Mg 系合金に Zn を添加し流動性の向上が計られる<sup>(4)</sup>。

これらの特性を見極める為、表4に示す A、B、C の3種の合金について特性の解析を行った。

表4 Al-Zn-Mg 系テスト合金化学組成 (Wt%)

|   | Zn  | Mg  | Fe   | Cr   | Mn   | Ti   | 相当合金     |
|---|-----|-----|------|------|------|------|----------|
| A | 6.0 | 1.0 | 0.80 | 0.30 | 0.15 | 0.20 | AA 712.0 |
| B | 4.0 | 2.0 | 0.20 | 0.15 | 0.50 | 0.20 | AA 707.0 |
| C | —   | 4.0 | —    | —    | 0.30 | —    | AC 7A    |

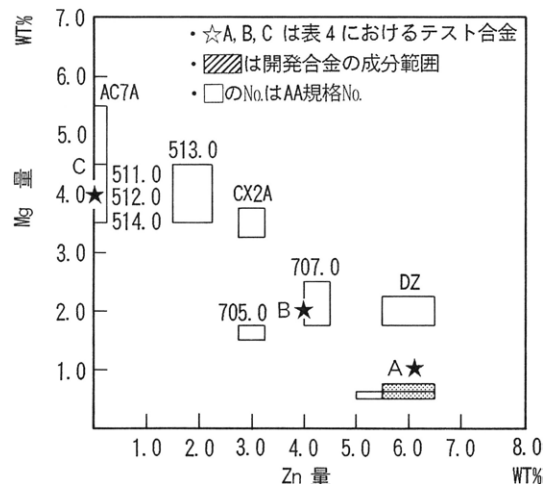


図2 代表的 Al-Zn-Mg 系合金の組成範囲

## (a) 凝固温度

熱分析の結果を図3に示す。参考に鋳造性の良好なAl-Si-Mg系のAC4CHを同時に示す。Al-Zn-Mg系合金はAl-Si-Mg系合金に対して固相線が約70℃高く凝固の完了が早い。Al-Mg系合金はその中間に位置する。

## (b) 流動性試験

図4にMIT式流動試験の結果を示す。本試験において流動性の良いAl-Si系合金は900~1000mmの流動長を示す。これと比較するといずれの合金も流動性は良くなく同等である。これは凝固温度

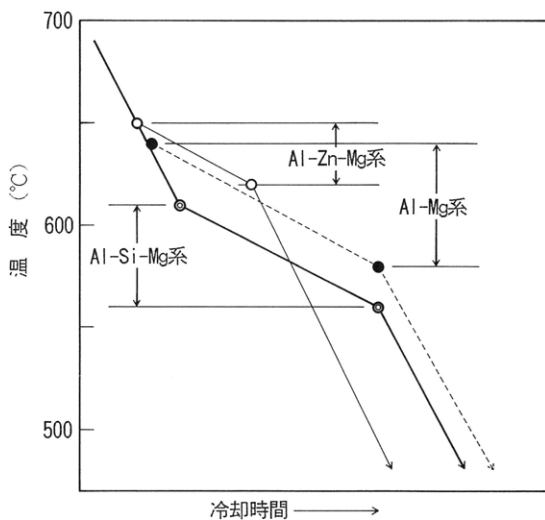


図3 各種Al鋳造材料の凝固範囲比較

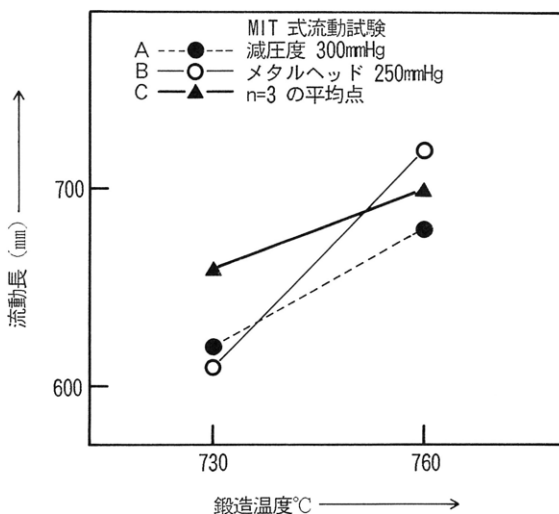
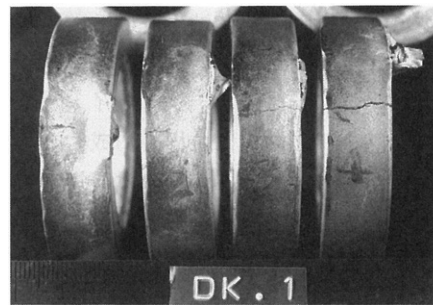


図4 流動長試験結果



左側より  
1. 2. 3. 4 度  
と評価し、  
割れが発生  
しない場合  
を0度とし  
た

図5 熱リング割れ評価基準

表5 熱間割れ試験

| 鋳込み温度 | 730℃ |      | 760℃ |      |
|-------|------|------|------|------|
| 型温    | 200℃ | 350℃ | 200℃ | 350℃ |
| 組成    |      |      |      |      |
| A     | 0.0  | 0.0  | 2.1  | 0.0  |
| B     | 0.0  | 0.0  | 0.9  | 0.0  |
| C     | 0.0  | 0.2  | 0.8  | 0.3  |

が高い事が影響していると思われる。

## (c) 熱間割れ試験

熱間割れの評価はリングテストで行った。

割れ評価基準により得られた10回の平均値を表5に示す。金型温度が低い場合はAの組成の割れ感受性は高いが金型温度を高くする事により割れの発生は無くなる。また鋳込み温度を下げ結晶核の再溶融を防止する事により割れ感受性は低下する。一方、CのAl-Mg系はシュリンケージが集まり、微細なクラックとなる。

## (d) テーターモールド試験

テーターモールドによる各組成のひけ特性を図6に示す。いずれもパイプ長さが長く押湯の効きはあまり良くないと考えられる。シュリンケージはAの組成が出にくい。シュリンケージは溶接ビードの品質に大きな影響を与えるため出にくい特性が望ましい。

以上の試験結果より、熱間割れに対して、重力金型鋳造においては金型温度の設定自由度が高く、凝固特性に合わせて金型温度を高く設定する事により解決でき、よりシュリンケージの発生しにくい高Zn低Mgの組成域を選定できた。

また開発途中において発生した割れのSEI(二次電子像)を図7に示す。Al-Zn-Mg系合金の熱間割れについては従来、固液共存域に於ける破断現象として捉えられていたが<sup>(5)</sup>、実際の鋳造時に発生する割れは図7-1に示すデンドライトがほとんどであり、図7-2の様に粒界を形成しているものは僅かである。従って熱間割れは鋳造プロセスから見た場合、デンドライト間の溶湯の未補給現象という側面が強い。

4.3. 耐応力腐食割れ性

Al-Zn-Mg系合金において耐応力腐食割れ性は重要である。クロム酸水溶液煮沸促進テストの結果を図8に示す。Mg量は耐応力腐食割れ性は変化を与える為、0.8%以下に規制する必要がある。また、耐応力腐食割れ性を向上する為に過時効条件(170℃×10hr)で熱処理を行っている。

4.4. 機械的性質

Mg量と機械的性質との関係を図9に示す。Mgは鋳造中に変動し易い成分である為、鋳造中の成分管理に注意が必要である。

母材及び溶接部の疲労強度特性を図10に示す。溶接熱影響部の回復により、溶接部は母材と同等の疲労強度を有する。

| 破面SEI像   | 発生率 | 原因          |
|----------|-----|-------------|
| <br>図7-1 | 95% | 指向性凝固の不足    |
| <br>図7-2 | 5%  | 収縮時及び離型時の割れ |

図7 Al-Zn-Mg系鋳物合金の鋳造割れ破面

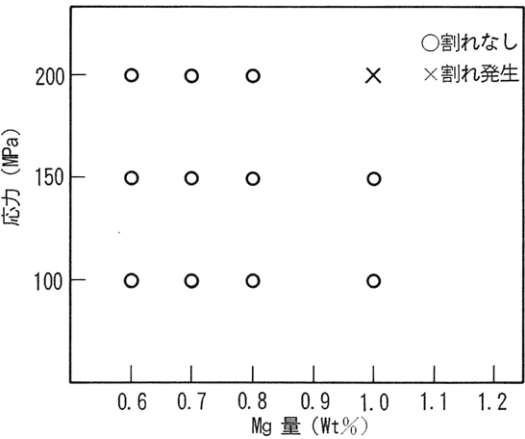


図8 Al-6%Zn合金の応力腐食割れ試験結果

| 組成   | A | B | C |
|------|---|---|---|
| 断面写真 |   |   |   |

金型温度 400℃  
注湯温度 730℃

図6 テーターモールド試験結果

## 5. Al-Si-Mg 系合金の開発

### 5.1. 化学組成

Al-Si-Mg 系開発合金の化学組成を表6に示す。Al-Si系の合金は铸造性が良いためアルミ铸造用合金のほとんどがこの系であるが、特に強度、靱性を重視する場合 Al-Si-Mg 系合金を使用する。Al-Si-Mg 系合金成分の Si 量は铸造性とアルマイト性から決定される。Al-Si 系の铸造性については広く調査されており、それらをまとめると以下のようになる<sup>(6)</sup>。

流動性は2~3% Si に流動長の極小点があり、Si 量の増加と共に液相線温度が低下し流動性は直線的に増加する。熱間割れ性は1~2% で最も割

表6 Al-Si-Mg 铸造合金の化学組成

| Si  | Mg   | Ti  | Cu   | Fe   | Al   |
|-----|------|-----|------|------|------|
| 4.5 | 0.25 | 0.1 |      |      |      |
| 5   | 5    | 5   | <0.2 | <0.2 | bal. |
| 5.5 | 0.40 | 0.2 |      |      |      |

れ感受性が高く4~5% 以上では割れの発生はほとんどなくなる。引け特性は準固相温度範囲が最も広い6~7% で押湯性が最も良く、Si 量が増えるとざく巣が発生し易くなる。これらを総合すると Si 量が5~8% の範囲が铸造性のバランスが良いとされている。

一方、アルマイト色調は Si 量が増えると共に共晶 Si の晶出量が増えるために灰色化する。図11に Si 量とアルマイト色調の関係を示す。Si 量の増加とともに色調の明度は灰色化し、艶の光沢度も低下する。Si 量が5~6% で光沢度・明度も急激に低下し外観性から Si 量は6% までに規制される。上記の理由から Si 量は5% とした。

また、強度は Mg の添加により向上が計られるが、0.4% 以上では強度の向上量は少なく靱性が低下する為に Mg 量は0.3% とした。さらに、結晶粒の微細化により靱性を安定化する為に Ti を添加した。

不純物としての Fe は、アルマイト色調及び靱性に悪影響を与える為に0.2% 以下に規制した。

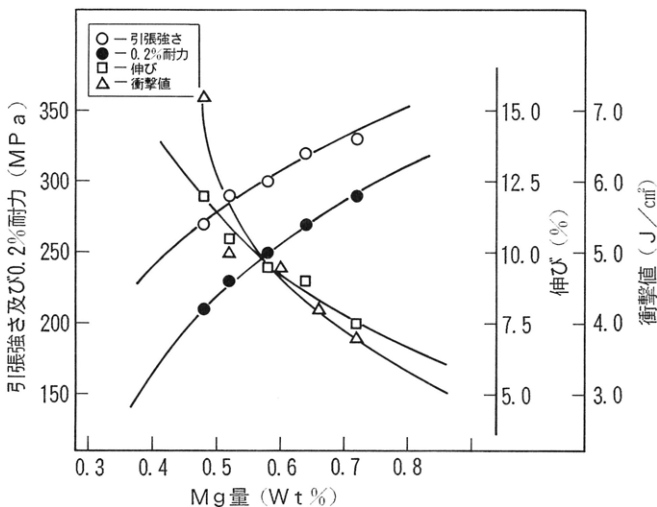


図9 Al-6%Zn合金のMg量と機械的性質の関係

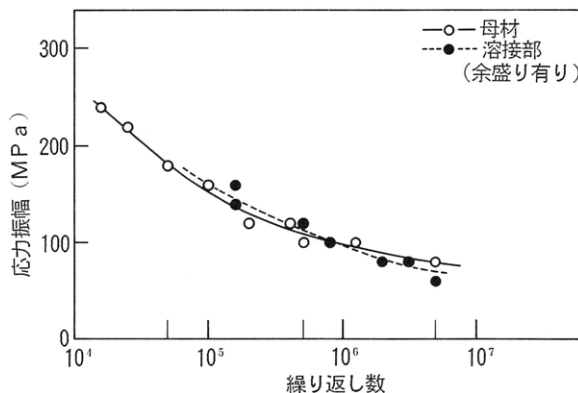


図10 Al-6%Zn-0.7%Mg 铸物材の疲労強度 (シェンク平面曲げ)

### 5.2. 溶接部強度

Al-Si-Mg 系合金の問題点としては溶接熱影響部の軟化がある。溶接部強度の評価にあたり、

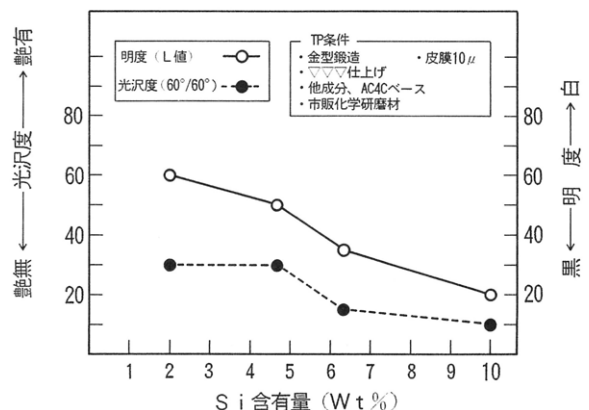


図11 Si 含有量と明度及び光沢の関係

従来は溶接ビード及び熱影響部全体を継手効率として評価してきたが、溶接熱影響部は溶接ビードからの距離により連続して強度が変化する。その為、新たに硬度と機械的性質の相関をとり、硬度分布から各部の強度を推定した。これにより複雑形状の各部の評価が可能となり、強度回復性のない材料でも耐久性の保証が可能となった。図12に本開発合金の硬度と機械的性質の関係を示す。また図13に母材及び溶接部の疲労曲線を示す。参考として、非熱処理型合金のAC7Aの疲労曲線も合わせて示す。本開発合金の溶接部とAC7Aの疲労強度はほぼ同等である。

### 5.3. アルマイト条件の改良

Al-Zn-Mg系合金の外観に近づける為に、更にアルマイト条件の改良を行った。

#### (1) 化学研磨条件

アルマイト処理工程中の前処理に採用している化学研磨条件では、処理液の $\text{HNO}_3$ 、 $\text{H}_3\text{PO}_4$ の濃度調整及び処理温度を高め、時間を伸ばした。

#### (2) 膜厚制御

膜厚はアルマイト皮膜の光沢度及び明度に大きな影響を及ぼす。膜厚が薄いと光沢は増し、明度も上がるが同時に耐食性も低下する。従って、外観性と耐食性の両方を満足する領域の設定が必要となる。耐食性評価にあたっては、先に市販したAl-Zn-Mg系合金のフレームのヨーロッパ等の塩

表7 各種ショットブラストのアルマイト性

| 材 質                | 径   | 均一性<br>(アルマイト後) | 外観(白さ)<br>(アルマイト後) | 量産性<br>(コスト含む) |
|--------------------|-----|-----------------|--------------------|----------------|
| STEEL GRID SHOT    | 1.2 | ○               | △～×                | ◎              |
|                    | 1.0 | ○               | △～×                | ◎              |
|                    | 0.8 | ○               | △～×                | ◎              |
| STAINLESS SHOT     | 0.3 | △～○             | ○                  | ○              |
|                    | 0.6 | ○               | ○                  | ○              |
|                    | 0.8 | ◎               | ○                  | ○              |
| PURE AL SHOT       | 1.2 | △～×             | △                  | △              |
|                    | 1.0 | △～×             | △                  | △              |
| AL ALLOY WIRE SHOT | 1.2 | △               | ○                  | △              |
|                    | 1.0 | △               | ○                  | △              |
| Zn ALLOY SHOT      | 1.2 | △               | △                  | △              |
|                    | 0.8 | △               | △                  | △              |
| 無 処 理              | —   | ××              | ××                 | —              |

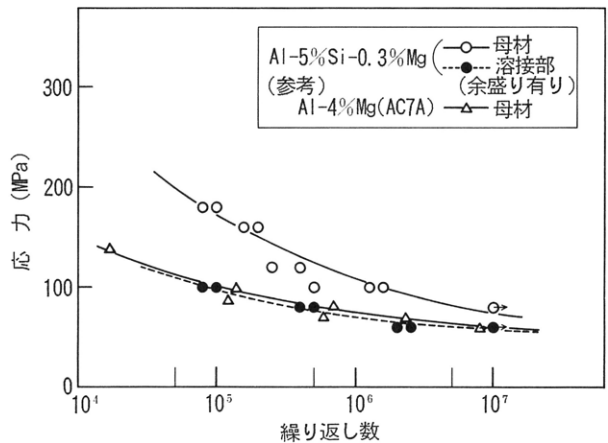


図13 Al-5%Si-0.3%Mg 鋳物材の疲労強度 (シェンク平面曲げ)

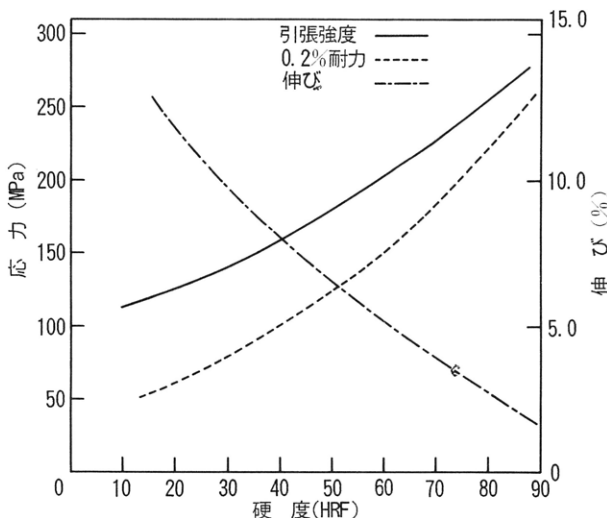


図12 Al-5%Si-0.3%Mg 合金の硬度と機械的性質の関係

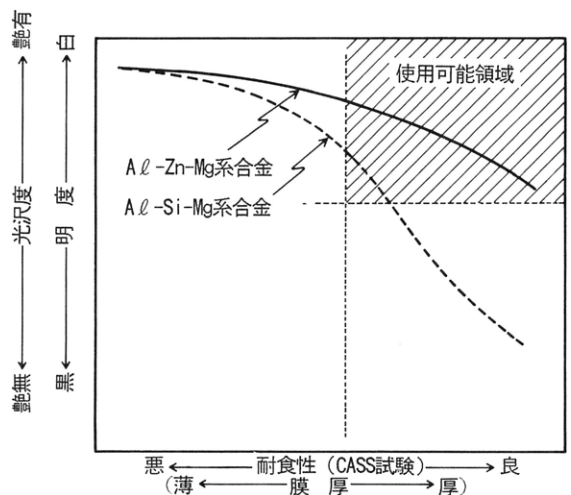


図14 外観(明度、光沢)と耐食性の関係

害地に於けるフィールドサーベイ結果及び錆実走テスト、これらを基にした二輪車錆濃縮モードテストにより評価基準を確立した。図14に耐食性と外観の相関を示す。これによりAl-Si-Mg系合金の外観性と耐食性が確立された。

### (3) 非研磨面の最表面層除去

鋳造品の表面は金型の急冷によりチル化され、Al-Si-Mg系合金においてはアルマイト色調が大きく阻害される。この為平坦部は研磨により表面層を除去しているが、凹部等は研磨によって除去出来ない事から他の機械的除去方法の検討が必要となり、ショットブラストの検討を行った。表7に示すようにステンレス0.6~0.8mmのグリッドで良好な外観を得る見通しを得た。

ショットブラストの導入によりAl-Si-Mg系合金においても平滑方面だけでなく研磨が出来ない複雑な形状を製品に取り入れることが可能となった。

## 6. ま と め

二輪車のフレームは、単なる構造体としてのみではなく外観上の重要なセールスポイントとして捉える必要があり、鋳造用合金の材料設計ではその考え方が外観・生産性に大きく影響を及ぼしてくる。この為、2種類の材料開発を経て現在に至っている。

二輪車においてアルミフレームが広く一般化した現在、強度、外観、生産性等をより高度にバランスした材料と製法の開発が期待される。

## 謝 辞

終わりに、本材料開発は昭和電工株式会社と共同で行われたものであり、協力いただいた太田晴通氏、團之原徹巳氏、石坂信啓氏に深く感謝する。

## 参 考 文 献

- (1) 施工法委員会、“アルミニウム合金鋳物とその溶接について”、軽金属溶接 vol. 20、7 (1982) p1~8
- (2) 上原照男、鈴木学、“アルミニウム鋳物と押し出し型材を使用したアルミニウムフレーム二輪車の溶接について” 軽金属溶接 vol. 24、(1986) p384-393
- (3) 林清流讃、中田毅、“アルミニウム-亜鉛-マグネシウム系合金の砂型鋳物への適用” 鋳物、57、4、(1985)、pp19~25
- (4) W. Patterson and S. Eagler, Aluminum, 35 (1959), p124.
- (5) 林清流讃、中田毅、“アルミニウム-亜鉛-マグネシウム系合金の鋳造割れ”、鋳物、56、1、(1984)、pp28~33
- (6) 北岡山治、藤倉潮三、神尾彰彦、“Al-Si系合金”、軽金属、vol. 38、7、(1988) pp426~446

## ■ 著 者 ■



高 崎 憲 政



小 屋 栄 太 郎



望 月 信 介