研究論文

アルミニウム合金 AC3A の研削による 残留応力とひずみ

米谷 茂* ・ 能登谷久公**
柴田 弘誓*** ・ 高辻 雄三**

Residual stress and distortion in AC3A aluminum castings by grinding

Shigeru YONETANI*, Hisakimi NOTOYA**
Kosei SHIBATA*** and Yuzo TAKATSUJI**

Eutectic Al-Si alloy castings AC3A annealed for stress relief were wet ground by the use of a quick stop grinding tester equipping a SiC-type grinder. Effects of grinding parameters and plastic deformation on the residual stress in the castings were evaluated from working conditions and residual stress by the X-ray method. Plastic strains in the ground subsurface were measured by the grid method. The maximum residual stress in the ground layer and the depth of tensile stress layer increase according to the depth of cut and work speed. The plastic strain in the grinding path changes at different working conditions.

Keywords: aluminum casting alloy AC3A, grinding, residual stress, distortion, grinding force, grinding fluids

(Received June 23, 1988)

1. 緒 言

前報¹⁾においてアルミニウム-けい素合金の研削を行い、研削層の残留応力の測定を行った。また、モアレひずみ^{2),3)}法によって研削面下の塑性ひずみを測定し、残留応力と塑性ひずみの関係について検討を行った。

その結果、研削面下には水溶性研削液では約 3 mm の深さまで、油性研削液を使用した場合でも約 2 mm の深さまで塑性ひずみを生じていることが知られた。また、研削液によって異なるが最大残留応力と垂直方向ひずみがよい対応関係を示すことを明らかにした。しかし、モアレひずみ法ではその特性上、研削面に近い部分はモアレ模様が不明確であり、測定精度がある程度維持できるのは表面下 0.8 mm より深い部分であった。

本研究ではより研削面に近い部分に発生する塑性ひずみが残留応力に及ぼす影響について検討するため、格子

法⁴⁾を用いて研削面下の塑性ひずみの詳細な測定を行った。

本研究においては前報¹⁾で用いた C24G 砥石の他に GC48H 砥石も加えて研削を行い、残留応力に及ぼす砥石の影響についても併せて検討した。

2. 実験方法

研削用試料は比較的加工硬化性の少ない軟質材であることを考慮して前報¹⁾と同様、アルミニウム-けい素鋳造合金 AC3A-F 材（シルミン）を選んだ。直径約 130 mm、長さ約 200 mm の金型鋳造材の外周に近い部分から、ひずみ測定用のものとして 70 mm × 20 mm × 5 mm、残留応力測定用には 70 mm × 20 mm × 10 mm の大きさに切出し、機械仕上げを行った。

これらの試料は 623 K、7.2 ks (350°C, 2 時間) の加熱処理を施し、機械加工によるひずみを除去して実験に供

* 金沢大学工学部（金沢市）。Faculty of Engineering, Kanazawa University (Kanazawa-shi, Ishikawa).

** 富山大学工学部（富山市）。Faculty of Engineering, Toyama University (Toyama-shi, Toyama).

*** 静岡大学工学部大学院（浜松市）〔現在：アイシン精機(株)（刈谷市）〕。Graduate School of Faculty of Engineering, Shizuoka University (Hamamatsu-shi, Shizuoka) [Present: Aishin Seiki Corp. (Kariya-shi, Aichi)].

した。

ひずみ測定は、70 mm×20 mm×5 mm の試料の70 mm×20 mm の面にラップ仕上げを行い、脱脂し、感光剤を塗布して充分乾燥させ、これに1インチ(25.4 mm) 当り1,000本の基準格子2枚を直角に重ねて露光、焼付けを行った。次にこれらの面に薬品処理およびエッチングを施して直交格子面を作成した。研削の際には、この格子面が内側になるようにし、もう1枚のラップ仕上げのみを施した試料を重ねて1個の試料とする。

本研究においては、砥石-試料接触面下の塑性ひずみを調べるため、研削急停止法⁴⁾によって砥石接触面を残した試料を作成した。格子ひずみを測定するための基準点の概略を Fig. 1 に示した。この場合、研削作用によって研削面から30 μm 程度の深さまでは格子の乱れが大きく、ひずみ測定は困難であったが、それ以上の深さになると格子がはっきり確認された。本実験の結果、ほとんどの場合回転を伴わない格子変形であることを考慮し、単に基準点の間隔の研削前後における変化より水平方向(研削方向)ひずみ ϵ_x 、垂直方向ひずみ ϵ_y を求めた。なお、測定精度を考慮して同一測定点付近で3~5か所のひずみを測定し、その平均値で示した。

残留応力の測定については、70 mm×20 mm×10 mm の試料の70 mm×10 mm の面を研削し、この面についてX線応力測定法のうち $\sin^2 \psi$ 法を用い Al (222) 面について表面より逐次除去を行いながら表面より内部までの残留応力分布を測定した。

使用砥石としては前報¹⁾で供用した炭化けい素系の

C24G5V の他に GC46H5V も加えて実験を行い、残留応力およびひずみに及ぼす砥石の影響についても検討した。

また、研削液の影響を検討するため前報¹⁾と同様水溶性研削液(JIS. W2 種2号相当, 図中 W-Type で示す)の50倍液と不水溶性研削液(JIS 2 種13号相当, 図中 O-Type で示す)の2種類を使用した湿式研削を行った。研削条件としては砥石速度を一定とし、塑性変形による格子の乱れをなるべく少なくするため工作物速度を低くして砥粒切込深さ⁵⁾が小さくなるようにした。

Table 1 に供試料の化学成分と機械的強度, Table 2 に X 線応力測定条件を示す。

3. 実験結果

3.1 研削残留応力

C 砥石、油性液で研削した場合の残留応力の状態を Fig. 2 に示した。表面は小さい引張応力または圧縮応力であるが、表面下約25 μm から50 μm の深さで最大引張残留応力(以下最大残留応力という)となり、これが内部へ向かってゆっくり低下し、ある深さで圧縮側に移っている。切込深さおよび工作物速度が増加すると最大残留応力および引張応力部分の深さは大となっている。

つぎに C 砥石、水溶性液を使用した場合の残留応力分布を Fig. 3 に示すが、Fig. 2 に示した油性液の場合より残留応力は全体に大きい。ここでも切込深さおよび工作物速度が大きい場合、最大残留応力および引張応力部分の深さは大となっている。

Fig. 1 Grid at the side of specimen and scheme of distortion measurement below the ground surface.

Table 1 Chemical compositions (mass %) and mechanical properties

Material	Si	Fe	Cu	Zn	Mg	Mn	Al
AC3A-F	11.4	0.32	0.13	0.10	0.06	0.03	bal
Tensile Strength					149 MPa		
Elongation					5.0%		
Hardness					54 HV		

Table 2 X-ray residual stress measurement conditions

Target & Filter	CrK α , Al(222), V,
Voltage & Current	30 kV, 10 mA,
Scanning Speed	1.16×10^{-3} rad/s
Count Full Scale	250 or 125 c/s
Time Constant	8
Irradiation Area	3 × 1 mm
Receiving Slit	0.3 mm

Fig. 2 Distribution of grinding residual stress in various grinding conditions. (C24G, O-Type)

Fig. 4 Distribution of grinding residual stress in various grinding conditions. (GC46H, W-Type)

Fig. 5 Influence of grinding conditions on the maximum grinding residual stress.

また、GC 砥石、水溶性液を使用した場合の結果を Fig. 4 に示す。残留応力の状態は Fig. 3 に示した C 砥石、水溶性液の結果と同様であり、砥石による差は大きくないようである。

これら残留応力の特徴を示すものとして最大残留応力の大きさおよび引張応力部分の深さを研削条件との関係であらわしたものをそれぞれ Fig. 5 および Fig. 6 に示す。

切込深さおよび工作物速度が増加すると最大残留応力は大となっており、全体的に水溶性液の方が油性液の場合に比べて最大残留応力は大きくあらわれている。

Fig. 3 Distribution of grinding residual stress in various grinding conditions. (C24G, W-Type)

Fig. 6 Influence of grinding conditions on the depth of tensile residual stress layers.

一方、水溶性液を使用し、砥石だけが異なる場合、最大残留応力に及ぼす砥石の影響はあまり大きくない。

つぎに、Fig. 6 に示される引張応力部分の大きさも切込深さおよび工作物速度の増加に伴って増大している。また、水溶性液を用いた方が油性液使用の場合に比べて引張応力部分の深さは大となっている。

3.2 砥石接触面下各部の塑性ひずみ

前報¹⁾においてはモアレ法によって研削面下の塑性ひずみを測定した。しかし、このとき研削面から0.8 mm程度の深さまでは詳細な測定は困難であった。格子ひずみ法を用いた本研究の場合においても研削面下約30 μm までは格子の乱れが大きくその読み取りは困難であった。それゆえ、本研究では研削面下約50 μm 以上の深さの各部における塑性ひずみを測定した。残留応力に関係するものとして、ここでも炭素鋼^{5),6)}の場合と同様、垂直方向ひずみ ϵ_y の発生状況とその変化について検討を行うものとする。

まず、C砥石、油性液使用の場合の垂直ひずみ ϵ_y の変化をFig. 7に示す。同図左側は工作物速度を一定として、切込深さを20 μm 、40 μm および60 μm と変えたもの、図の右側は切込深さを一定として、工作物速度を0.01 m/s、0.02 m/sおよび0.05 m/sとそれぞれ変えた場合のものである。これらのひずみは砥石-工作物接触面における未研削点より接触面に沿って約0.5 mmずつはなれた部分の各深さにおける垂直方向ひずみの変化を調べたものである。全体的にみると表面に近い部分ほどこのひずみは引張側あるいは圧縮側に大きく変化しており、内部ではこれらのひずみの変化は小さくなることが示される。切込深さおよび工作物速度が大となると、

未研削点近くの圧縮ひずみは大きく、また研削終了点における引張ひずみも大となっている。

つぎに、C砥石、水溶性液の場合をFig. 8に示す。ここでも砥石接触面下各部における垂直ひずみの変化は油性液の場合と同じ傾向を示している。しかし、未研削点に近い部分での圧縮側への変化および研削終了点下での引張側への変化は油性液のものより大となっている。

また、GC砥石、水溶性液の場合の各部の垂直ひずみの変化をFig. 9に示す。この場合の垂直ひずみはC砥石、水溶性液の場合と同じような変化を示している。

以上、各条件で求められた砥石接触面下各部の垂直方向ひずみと研削層に生じる残留応力との関係を検討する

Fig. 8 Distribution of normal strains in the subsurface under wheel-work contact areas. (C24G, W-Type)

Fig. 7 Distribution of normal strains in the subsurface under wheel-work contact areas. (C24G, O-Type)

Fig. 9 Distributions of normal strains in the subsurface under wheel-work contact areas. (GC46H, W-Type)

ため、各条件における表面下約50 μm と100 μm の深さの垂直ひずみ ϵ_y の変化を砥石接触面に沿ってプロットしたものをFig. 10に示した。Fig. 10で白マークは表面下50 μm 、黒マークは100 μm の深さのひずみ ϵ_y をそれぞれ示すものである。全体的にみると未研削点近くで垂直ひずみは圧縮側に生じ、これが少しはなれた点で引張側に移行し、大きい引張ひずみとなって研削終了点に達している。

各場合について垂直ひずみ ϵ_y の変化をみると、C砥石、油性液（図上部）の場合、切込深さおよび工作物速度が増加すると、未研削点近くの圧縮ひずみは大きくなり、研削終了点の引張ひずみはやや大となっている。C砥石、水溶性液（図中央部）の場合、油性液の場合にくらべて未研削点近傍の圧縮ひずみ、研削終了点下の引張ひずみはいずれも大となっている。GC砥石、水溶性液（図下部）の場合、未研削点に近い圧縮ひずみはC砥石、水溶性液の場合ほど大きくはない。しかし、研削終了点下の引張ひずみはC砥石、水溶性液の場合と同程度に大となっている。

これらの砥石接触面下の塑性ひずみは先に報告した炭素鋼^{3),6)}焼なまし材の場合の塑性ひずみの変化とよく似

ている。したがって、アルミニウム-けい素合金においても研削層の塑性ひずみが残留応力の発生に影響することが考えられる。

そこでFig. 10における50 μm と100 μm の各深さにおける垂直ひずみを平均したものについて、未研削点に近い最大圧縮ひずみを ϵ_{y1} 、研削終了点下における引張ひずみを ϵ_{y2} として、切込深さおよび工作物速度との関係で示したものがFig. 11である。圧縮ひずみ ϵ_{y1} は切込み深さおよび工作物速度が増加すると大となっており、研削液および砥石の影響は明らかではない。

一方、引張ひずみ ϵ_{y2} は水溶性液の場合、切込深さおよび工作物速度が大きくなるとかなり大となっている。しかし、油性液の場合、研削終了点下におけるひずみ ϵ_{y2} は比較的小さい。また、研削層に発生する塑性変形には研削抵抗が関与するものと考え、研削抵抗の垂直方向成分Fnと未研削点近傍の垂直ひずみ ϵ_{y1} の関係を切込深さおよび工作物速度でまとめたものをFig. 12に示した。ここでC砥石のものは研削液の種類とは関係なく、研削抵抗Fnとひずみ ϵ_{y1} は良好な比例関係を示している。一方、GC砥石の場合は別の対応関係が示される。すなわち研削抵抗Fnとひずみ ϵ_{y1} の関係は砥材および砥石粒度の影響を受けていることが示される。

4. 残留応力発生に関する考察

従来、研削層にみられる大きい引張残留応力は主として研削熱の発生による熱応力の影響によるものと考えられ、解析と検討⁷⁾がなされている。

このような残留応力発生に及ぼす研削熱の影響はもちろん考慮されるべきものであるが、著者らは、工作物の除去過程において砥粒の掘起しに伴う研削層の塑性変形

Fig. 10 Change of normal strains in the subsurface of wheel-work contact areas.

Fig. 11 Influence of grinding conditions on normal strains in the subsurface of wheel-work contact areas.

Fig. 12 Influence of grinding force on normal strains near the pre-grinding points.

が残留応力に及ぼす影響も考慮されるべきものと考え、実験的検討と考察^{5), 6)}を行ってきた。

本研究では比較的可塑性の大きいアルミニウム合金を対象に、研削面下の塑性変形が残留応力に及ぼす影響を検討した。

ここでも変形の前後も体積変化がないものとする、研削面下の垂直ひずみが圧縮ひずみであればこれと直角の方向（すなわち研削方向）に圧縮残留応力を生じ、垂直ひずみが伸びひずみであれば研削方向に引張残留応力を生じingことを考慮すると、研削面下の塑性ひずみが残留応力の大小およびその種類に影響することが考えられる。

まず、垂直ひずみ ϵ_{y1} と最大残留応力 $\sigma_{\max}$ との関係を Fig. 13 に示す。水溶性液の場合、砥石が異なってもひずみ ϵ_{y1} と最大残留応力 $\sigma_{\max}$ はほぼ一様な比例関係を示している。次にひずみ ϵ_{y2} と引張応力部分の深さ d の関係を Fig. 14 に示す。この場合も水溶性液使用の場合には砥石が異なってもほぼ一様な比例関係を示している。油性液使用の結果によるとひずみ ϵ_{y2} および引張応力部分の深さ d は共に小さく、またその比例関係は水溶性液の場合とは異なったものとなっている。

垂直方向の研削抵抗と未研削点に近い垂直ひずみの関係を示した Fig. 12 において、砥石によってその対応状態は異なるが、研削抵抗が大きい場合、垂直ひずみは大となっている。この圧縮ひずみを生じた部分の多くは以後の研削の進行に伴って除去されるが、その一部は最終過程で研削表層となって残留する。そして、この大きい圧縮ひずみを生じた部分ほど大きい引張作用を受けて大きい引張残留応力を生じることになる。表層が引張作用

Fig. 13 Relations between the maximum residual stresses and the normal strains near the pre-grinding points.

Fig. 14 Relations between the depth of tensile stress layers and the normal strains under the end grinding points.

を受けるとさらにその下の層には垂直方向に引張ひずみを生じる結果となる。これが研削終了点下における垂直ひずみであり、ひずみ ϵ_{y2} で示されるものはそのひずみの一部であると考えられる。全体的には未研削点近くの圧縮ひずみ ϵ_{y1} が大きいほど研削終了点下の伸びひずみ ϵ_{y2} が大きくあらわれている。これらのことは研削抵抗が大きく、未研削点近傍に大きい圧縮ひずみを生じるとき、研削後に大きい引張残留応力を生じる結果となることと一致する。

Fig. 13 にみられたひずみ ϵ_{y1} と残留応力 $\sigma_{\max}$ との関係、また Fig. 14 にみられたひずみ ϵ_{y2} と引張応力部分の深さ d との関係において、水溶性液の場合はそれぞれ良好な対応状態を示している。また、砥石切込深さを変えた場合と工作物速度を変えた場合にもほぼ同様なことがいえる。しかし油性液使用の場合、未研削点近傍のひず

み ε_{y1} および研削終了点下のひずみ ε_{y2} は、水溶性液のものにくらべて小さくなっている。結果として研削液の影響をみると、潤滑性に富む油性液の方が冷却性に富む水溶性液より最大残留応力 $\sigma_{\max}$ および引張応力部分の深さ d が共に小となっている。

5. 結 言

軟質材であるアルミニウム-けい素鋳造合金(AC3SA-F 材)について研削砥石および研削液を変えて研削し、X 線応力測定法によって研削層の残留応力の測定を行った。また、格子ひずみ法によって砥石-工作物接触面下の研削層に発生する塑性ひずみを詳細に調べ、残留応力の発生に及ぼす塑性ひずみの影響について検討を行った。その結果、

(1) 研削条件の影響については工作物速度、砥石切込深さが大きくなると研削抵抗および残留応力は増加するが、研削液および砥石によってその増加傾向は異なっている。油性液使用の場合、残留応力は全体的に小さい。

(2) 砥石-工作物接触面下各部の垂直ひずみは、砥石接触面に沿って大きく変化している。表面近くにおけるこれらのひずみは残留応力とよく対応しており、これらのひずみが残留応力の発生に影響することが考えられる。

参 考 文 献

- 1) 能登谷久公, 米谷 茂, 高辻雄三, 柴田弘誓: 軽金属, **35** (1985), 618.
- 2) 山田嘉明, 荒井 諭, 西本勇三: 金属材料, **7** (1972), 159.
- 3) 加藤和典: 日本機械学会東海支部講習会テキスト (1981).
- 4) 堤 成晃: 塑性と加工, **13** (1972), 149.
- 5) 米谷 茂, 能登谷久公, 高辻雄三: 日本金属学会誌, **47** (1983), 72.
- 6) 米谷 茂, 能登谷久公, 高辻雄三: 材料, **33** (1984), 1250.
- 7) たとえば江田弘, 貴志浩三: 日本金属学会誌, **35** (1971), 896.