

精密万能試験機 AGX™-V、マイクロビッカース硬度計 HMV™-G31FAシリーズ、電子線マイクロアナライザ EPMA™-8050G、示差熱/熱重量同時測定装置 DTG-60、熱機械分析装置 TMA-60

## ラジアルフォーミング加工によるEV駆動用 モーターシャフトの多角的評価

矢野 文彬、小野 卓男、大城 真愛、長西 敦子

### ユーザーベネフィット

- ◆ ラジアルフォーミング加工で製造された中空シャフトの多角的評価により加工技術や材料強度の向上が期待できます。
- ◆ 精密万能試験機と硬度計により金属材料の力学的特性の評価が可能になります。
- ◆ EPMAと熱分析により金属材料の元素分布測定や強度向上に関する相変態の評価が可能になります。

### ■はじめに

近年、温室効果ガスの排出量削減に向けて、脱炭素化への流れが加速しています。中でも自動車産業の電気自動車（EV）シフトが、脱炭素社会の実現に向けて大きな役割を担っていると云えます。EV化の普及のためには、航続可能距離の向上が求められており、車体の軽量化が開発テーマとして挙げられています。その中でも特にシャフトの軽量化は、単に航続距離の改善だけでなく、慣性力を抑えることによるモーターの応答性の向上が期待されるため、重要な開発テーマとなっています。ラジアルフォーミング加工とは、中空シャフトの新しい鍛造技術のことで、ハンマー（金型）によって中空シャフトや中空軸の径方向から力を与える一方で、芯金を挿入し内径形状を転写させることで、内外径同時に成形することが可能です<sup>1)</sup>。ラジアルフォーミング工法による中空シャフトは強度と軽量化を両立した製品であり、次世代シャフトとして注目されています。

前報<sup>2), 3)</sup>のモーターシャフトの静的引張試験や硬さ試験による力学的特性の評価に加え、今回は新たに電子線マイクロアナライザによる元素分析と熱分析装置による熱特性評価を実施しました。本稿では、表1に示す通り各々の測定結果を比較したモーターシャフトの多角的評価例をご紹介します。

### ■静的引張試験（試験片情報）

試験片はラジアルフォーミング加工品3種類と加工無（BLANK品）の4種類の製品から切り出しました。ラジアルフォーミング加工品はBLANK品に対して、断面積の減少量が50、60、70%となるように鍛造加工しました。図1に試験片切り出し位置のイメージ図を示します。試験片は製品表層を基準に4~28mmまで、6mmごとに5か所から切り出しました。ただし、減面率70%のラジアルフォーミング加工品については4~22mmの4か所から試験片を切り出しました。表2に試験片情報を示します。

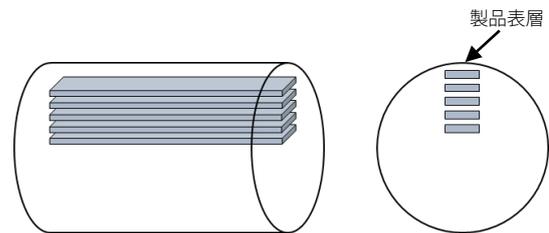


図1 試験片切り出し位置のイメージ図

表1 本稿の構成

評価方法	評価内容
①静的引張試験	・引張強さ、弾性率、破断伸びの測定
②硬さ試験	・ビッカース硬さの測定
③元素分布測定	・元素マッピング分析 ・引張強さと元素マッピング分析の比較 ・破断伸びと元素マッピング分析の比較 ・硬さ試験と元素マッピング分析による硬さの局所的測定の評価
④熱特性評価	・示差熱と熱重量の測定（TG-DTA測定） ・熱機械分析（TMA測定）

表2 試験片情報

試験片材料	: SCr420
試験片寸法	: 厚さ: 2.5 mm、幅: 11 mm 平行部長さ56 mm
試験片種類	: 試験片①BLANK品 試験片②ラジアルフォーミング品（減面率 50%） 試験片③ラジアルフォーミング品（減面率 60%） 試験片④ラジアルフォーミング品（減面率 70%）
試験片切り出し位置	: 4、10、16、22、28 mm ※試験片④のみ 4、10、16、22 mm

（試料提供：株式会社都筑製作所様）

## ■ 静的引張試験（測定結果）

引張試験は、精密万能試験機AGX-Vを用いて実施しました。図2に試験の様子を示します。図2のように、試験片の破断伸びを測定するために非接触式伸び幅計TRViewXを取り付けています。図3に試験片裏面の様子を示します。正確な弾性率とポアソン比を測定するために試験片裏面に2軸のひずみゲージを貼り付けて試験を行いました。装置構成を表3に示します。試験条件はJIS Z2241を参考に設定しました。表4に試験条件を示します。試験結果の一例として、図4に試験片①と試験片②の応力ひずみ線図を示します。試験片切り出し位置はそれぞれ4 mmになります。

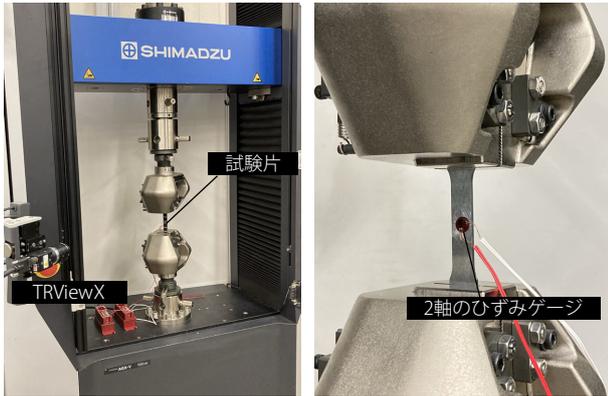


図2 試験の様子

図3 試験片裏面の様子

表3 装置構成

精密万能試験機	: AGX-V
ロードセル	: 100 kN
つかみ具	: 定位置くさび式つかみ具
伸び計	: TRViewX120S
ソフトウェア	: TRAPEZIUM™X-V

表4 試験条件

試験速度	: V1 10 MPa/sec V2 5 %/min (V2>V1でV2へ切替) V3 40 %/min (ひずみ1%で切替)
標点間距離	: 30 mm (TRViewX)
試験数	: n = 3

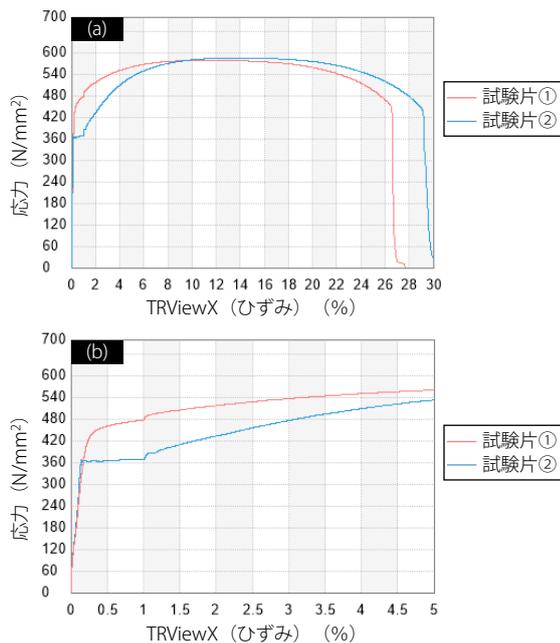


図4 応力ひずみ線図の一例  
(a) 試験全域 (b) 試験初期

図4のようにBLANK品である試験片①には降伏点は現れませんでした。ラジアルフォーミング加工を行うと試験片②のように降伏点が現れました。図5に表層からの試験片切り出し位置に対する各力学的特性を示します。引張強さと弾性率はBLANK品とラジアルフォーミング加工品で差がありますが、試験片切り出し位置による差はほとんどありませんでした。ポアソン比は試験片切り出し位置、ラジアルフォーミング加工の有無によらずほぼ一定の値となりました。破断伸びに関しては、表層から16 mmまでは、ラジアルフォーミング加工の有無によらずほぼ一定の値となっています。一方で、試験片②、③の22、28 mmの破断伸びは低下しています。これらの結果から、優れた特性を示す加工領域を把握することができます。

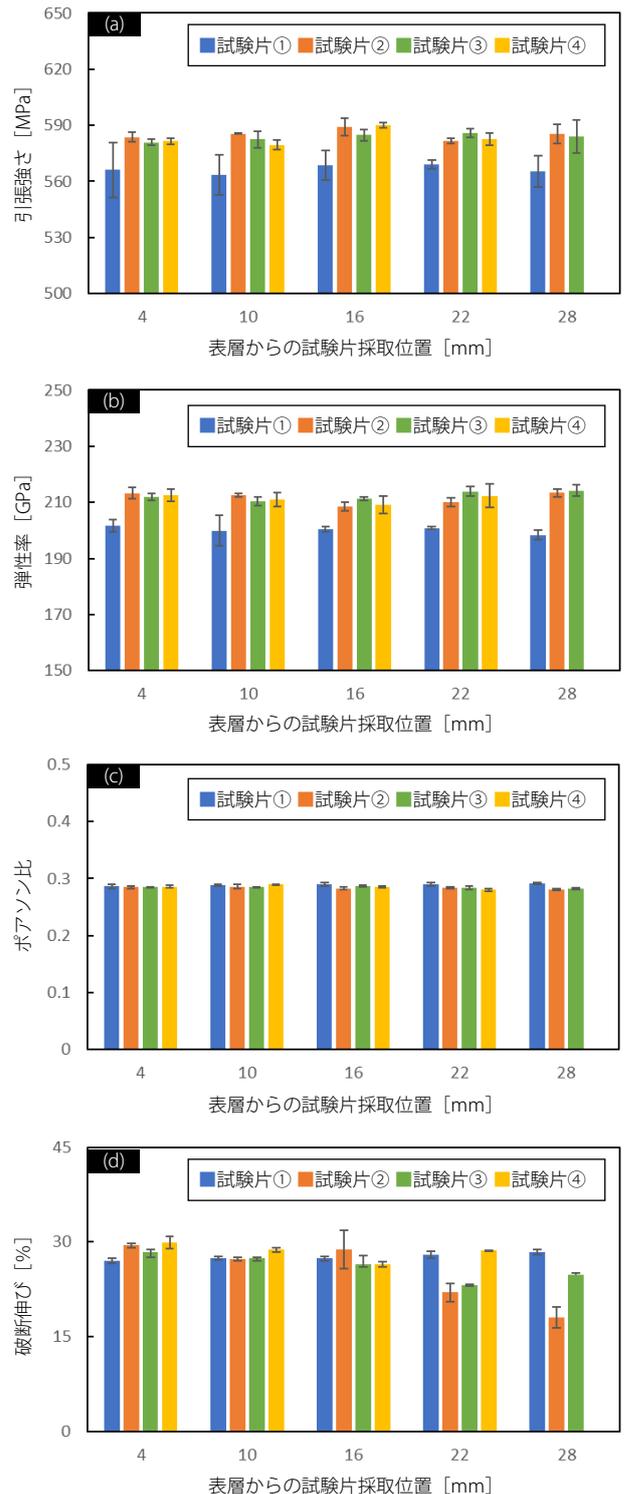


図5 表層からの試験片切り出し位置に対する各力学的特性  
(a) 引張強さ (b) 弾性率 (c) ポアソン比 (d) 破断伸び

## ■ビッカース硬さの測定（試験片情報）

ラジアルフォーミング加工前の試験片であるBLANK品の切り出し位置を図6(a)に示します。円柱形状（点線）の材料から色付き部を切り出しています。ラジアルフォーミング加工した試験片4種類（減面率50%を1か所、70%を3か所）の切り出し位置を図6 (b) (c) に示します。これらを鏡面研磨し、図6の赤点線のラインに沿って表面側から1 mm間隔で約30点のビッカース硬さの測定をしました。測定条件を表5に示します。図7は硬度計のステージビューワ機能で撮影し測定箇所を示した画像です。図8は測定後の圧痕画像の1例です。

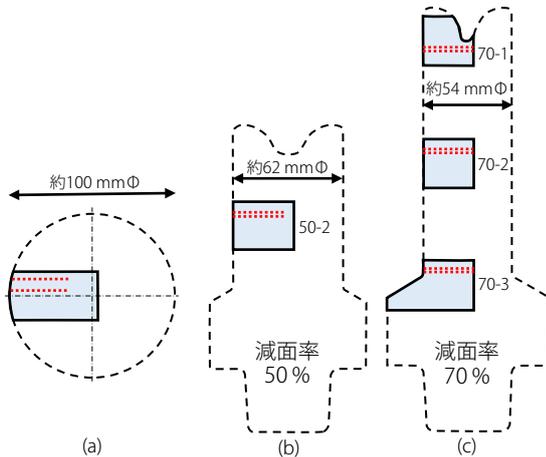


図6 試験片の切り出し位置と測定位置  
(a)BLANK品 (b)ラジアルフォーミング加工品（減面率 50%）  
(c)ラジアルフォーミング加工品（減面率 70%）

表5 測定条件

硬度計	: マイクロビッカース硬度計 HMV-G31-FA
圧子種類	: ビッカース圧子
試験力	: HV0.2 (1.96 N)
保持時間	: 10秒
測定間隔および回数	: 1 mm間隔で29点または30点

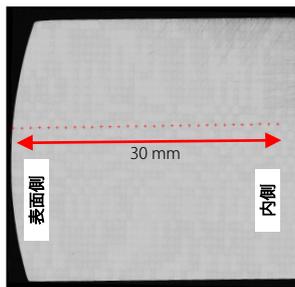


図7 ステージビューワ機能によるBLANK品の画像

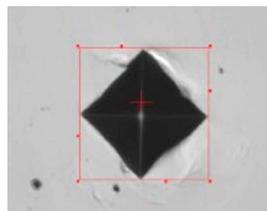


図8 圧痕画像 (BLANK品2回目24点目)

## ■ビッカース硬さの測定（測定結果）

測定結果を図9～図13に示します。硬さの分布は、BLANK品は表面付近は硬く、内部に向かって下がって6 mm程度より内部はほぼ一定の傾向がみられました。一方、ラジアルフォーミング加工品の50-2や70-2は、表面や内部に限らずほぼ一定でした。また、同じ減面率70%のラジアルフォーミング加工品同士を比較すると、先端側（70-1）と根本側（70-3）の内部側の測定値のバラつきが大きい傾向がみられました。この要因の調査についてはEPMAを用いた元素マッピング分析結果と合わせて6頁に示します。

以上の結果から、BLANK品は表面付近の硬さが高い傾向がみられましたが、ラジアルフォーミング加工品においては鍛造加工の度合い（叩かれる時間の長さ）による硬さの違いの大きな有意差は無いことがわかりました。

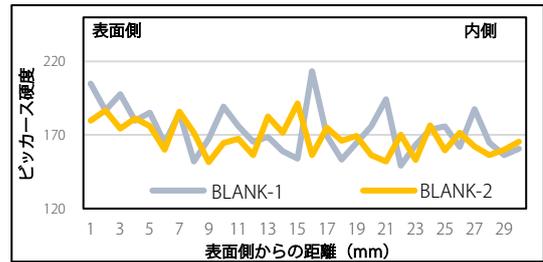


図9 BLANK品の硬さ測定結果

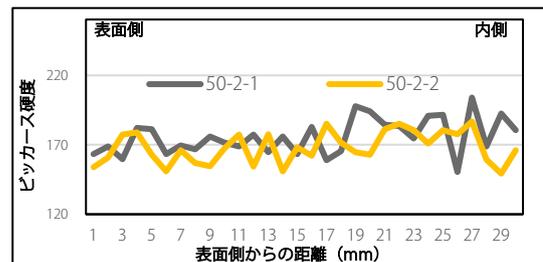


図10 ラジアルフォーミング加工品の硬さ測定結果 (50-2)

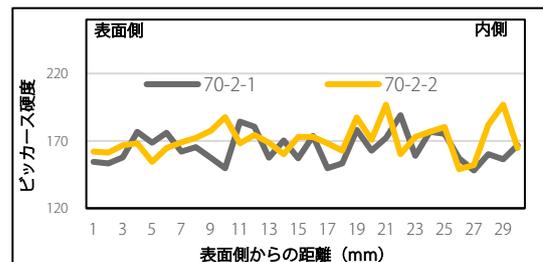


図11 ラジアルフォーミング加工品の硬さ測定結果 (70-2)

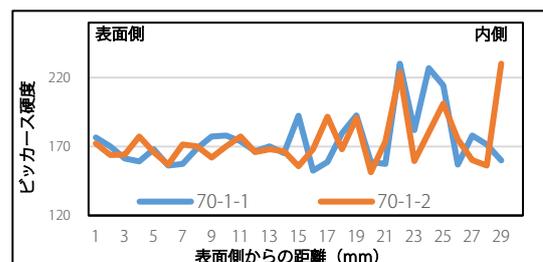


図12 ラジアルフォーミング加工品の硬さ測定結果 (70-1)

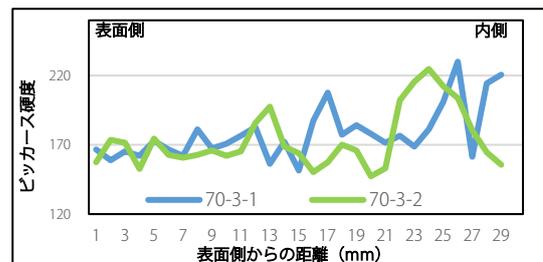


図13 ラジアルフォーミング加工品の硬さ測定結果 (70-3)

## ■ EPMAによる広域元素マッピング分析

硬度計にて打痕したBLANK品とラジアルフォーミング加工品の50%、70% (図6参照) のくぼみ位置に沿って広域の元素マッピング分析をしました。1例としてラジアルフォーミング加工品 (減面率50%) の反射電子像と主要含有元素であるC、Si、Cr、Mn、Feの元素マッピング像を図14に示します。また、特に特徴的な分布を示すCとCrについて、各試験片3種の表面側から内部側へ3~5mm、9~11mm、15~17mm、21~23mm、27~29mmに相当する部分を拡大した元素マッピング像を図15~図17に示します。なお、反射電子像はSEM像の1種で、主に平均原子番号の差と、結晶方位や極端な凹凸 (ピッカースで打痕したくぼみ) などの表面形状の情報がコントラストの差として表れます。元素マッピング像は検出されたX線強度をカラー表示しており、強度が高い程、その部位の元素の濃度が相対的に高いことを示します。

各元素の分布に注目すると、ラジアルフォーミング加工品は特にSi、Cr、Mnにおいて表面に平行な方向 (縦方向) に沿った組成分布の流れが現れています。ラジアルフォーミング加工の過程で結晶や組織が変化し、特定の微量元素が偏析したと考えられます。また、表面から浅い部分は微細で、深い部分は太くて濃淡の差が大きい分布になっています。また、減面率70% (70-2) の方が50% (50-2) よりも微細な分布になっており、鍛造加工の度合いが高い (叩かれる時間が長い) ことにより結晶粒径や組織が変化していると考えられます。

## ■ 鍛流線の観察

ラジアルフォーミング加工品の試験片同等品の断面を化学処理し、鍛流線を観察しました。図18は減面率50%の断面写真で、鍛流線の流れにうねりがあることがわかります。さらに先端側を拡大し、EPMAによるCrの元素マッピング像を重ね合わせたものを図19に示します。このように、鍛流線とCrの元素分布の流れが一致することがわかります。

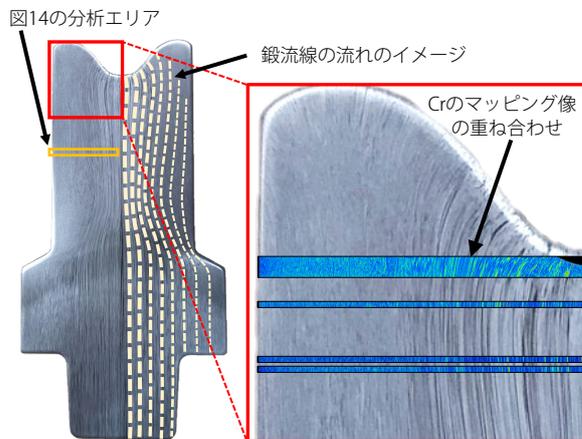


図18 減面率50%断面の鍛流線観察写真

図19 鍛流線観察像の拡大とCrの元素マッピング像の重ね合わせ

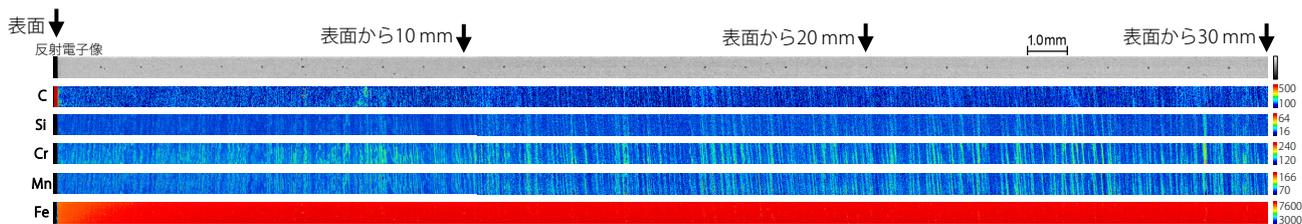


図14 広域元素マッピング像 (50-2)

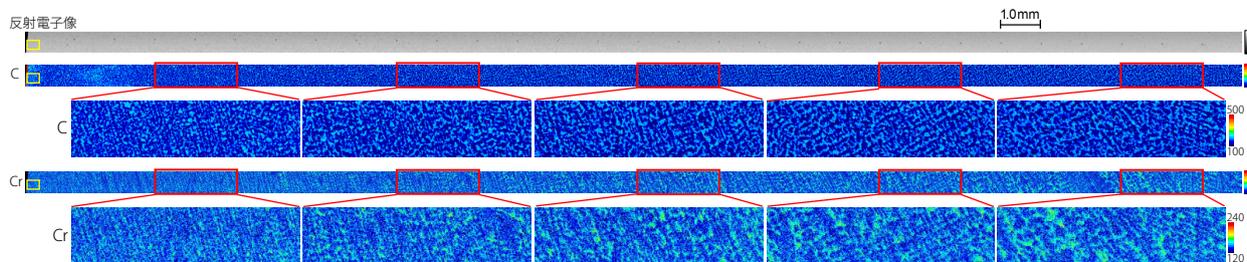


図15 広域元素マッピング像 (BLANK品)

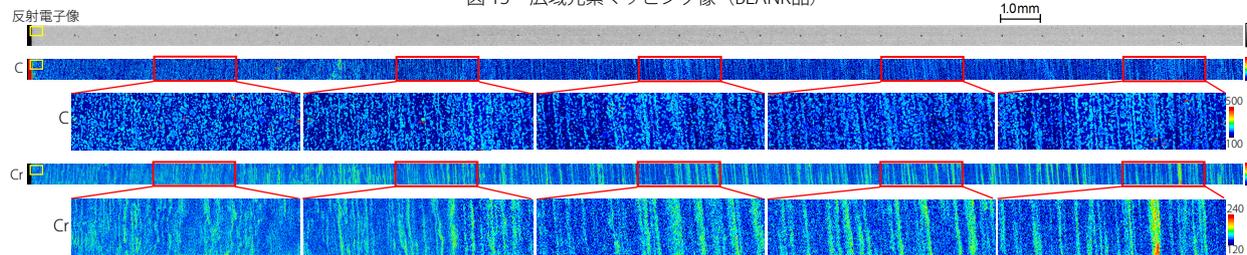


図16 広域元素マッピング像 (50-2)

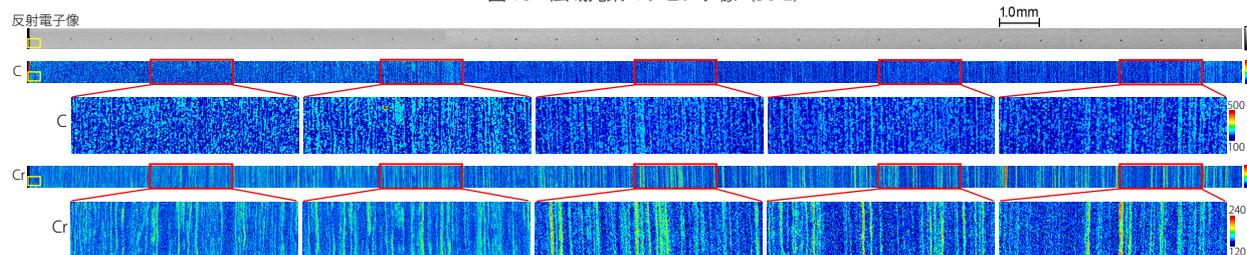


図17 広域元素マッピング像 (70-2)

## ■ EPMAによる狭域マッピング分析

BLANK品、ラジアルフォーミング加工品（50%、70%）の表面付近の狭域マッピング分析をしました。前頁の図15～17の表面付近を拡大したマッピング像を図20に、さらに図20の枠部を拡大したマッピング像を図21に示します。反射電子像はチャネリングコントラストによる結晶方位を反映した像が得られ、ラジアルフォーミング加工により結晶粒が細かくなっていることがわかります。Crの分布をみるとラジアルフォーミング加工品は表面に平行な方向（縦方向）

に沿った組成分布の流れが明瞭に現れ、特に70%は精細な分布になっています。図20のCの分布をみると、ラジアルフォーミング加工品の70%は50%と比べてCが析出された組織が小さい傾向がみられます。拡大した図21では細かい層状の組織（パーライト；フェライト（ $\alpha$ 鉄）とセメンタイト（ $Fe_3C$ ）の2相に分離した組織）がみられ、ラジアルフォーミングによる加工時間が長いほど、層の間隔が狭い傾向がみられており、強度が増していると推測されます。微小析出物の評価事例の詳細は別報<sup>4)</sup>をご参照ください。

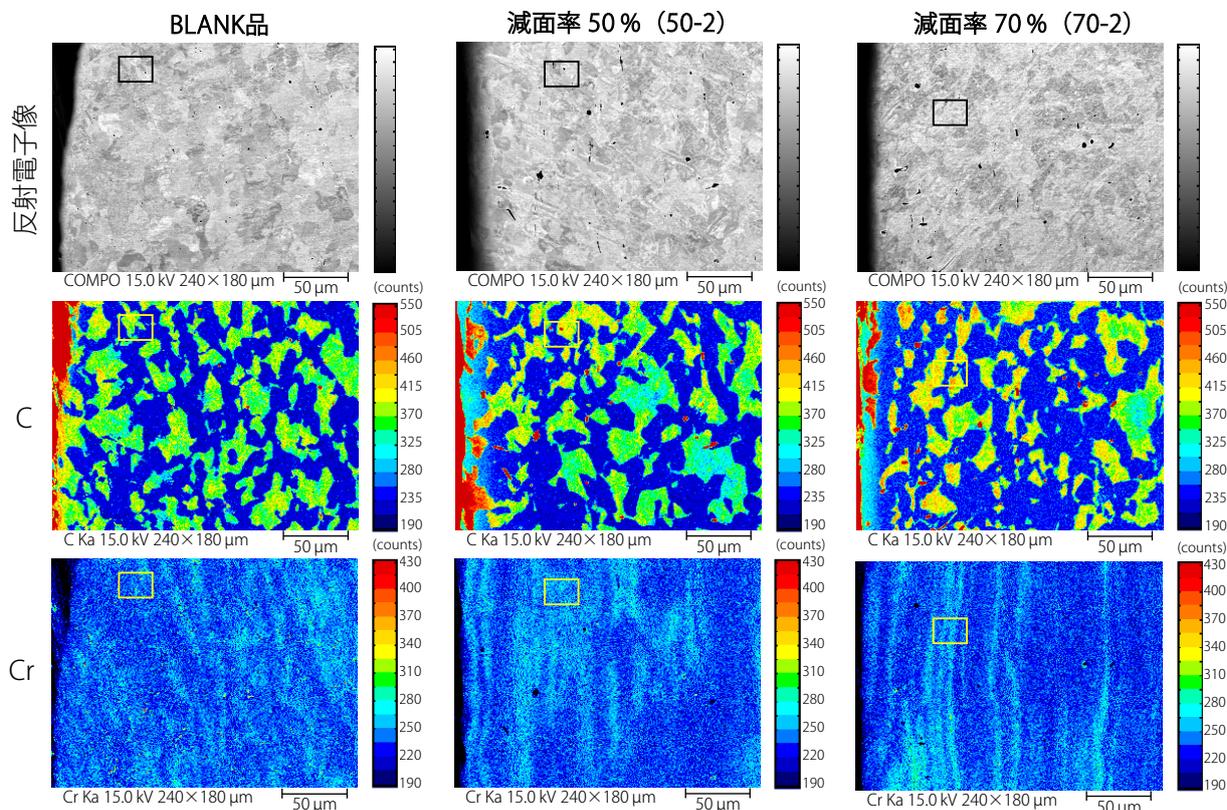


図20 表面付近の元素マッピング像（図15～17の黄色枠部の拡大）

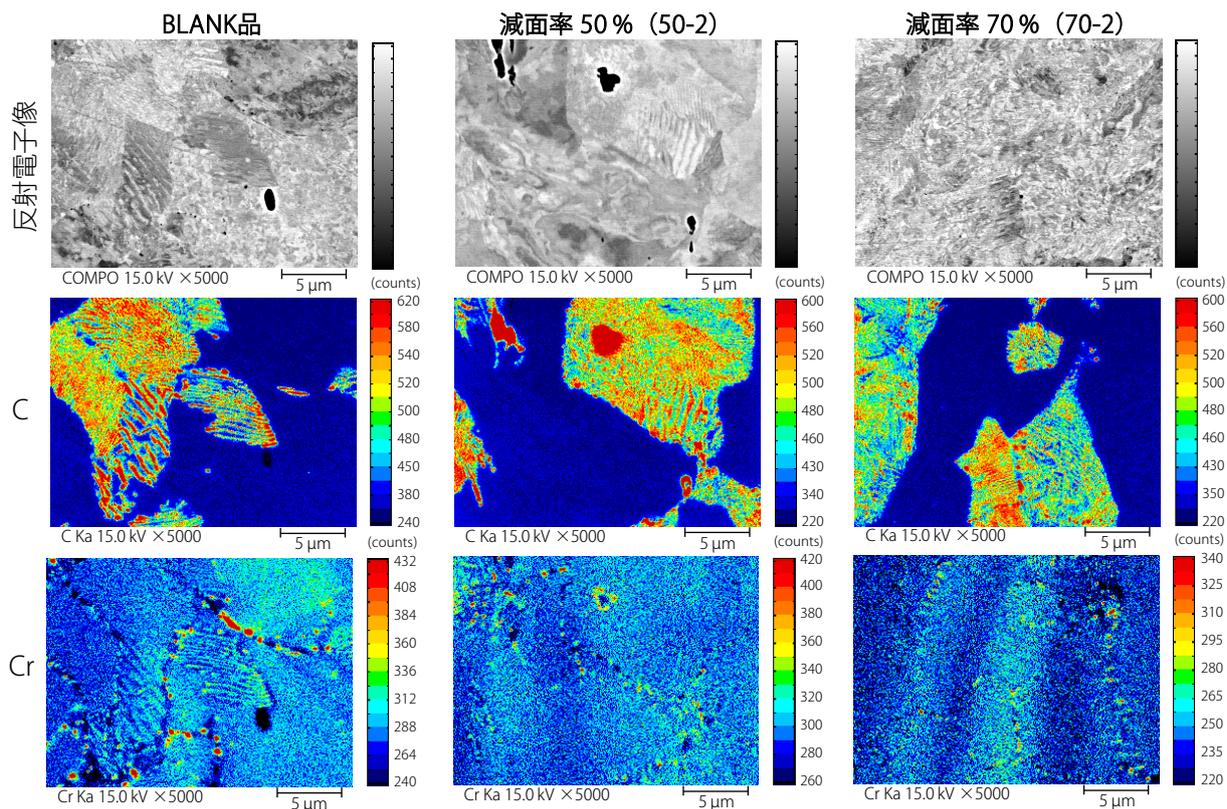


図21 表面付近の元素マッピング像（図20の枠部の拡大）

### ■ 引張強さと元素マッピング分析の比較

静的引張試験の引張強さの結果 (図5(a)) から、ラジアルフォーミング加工品の引張強さがBLANK品よりも大きくなっています。これは、EPMAによる元素マッピング分析 (4~5頁) の結果から、ラジアルフォーミング加工品は組織や結晶粒が細かくなっているため強度が向上したと考えられます。

### ■ 破断伸びと元素マッピング分析の比較

静的引張試験の破断伸びの結果 (図5(d)) から、試験片②の減面率50%の破断伸びが内部側で低下している傾向がみられます。これは、EPMAによる元素マッピング分析 (図14、図16) や鍛流線の写真 (図18、図19) からわかるように、減面率50%の鍛流線の流れが場所により引張試験方向に対して平行ではなく波打つように曲がっている傾向があるため、引っ張る際に材料として弱い部分が破断し易くなるためと考えられます。なお、今回目指している製品形状は中空であり、内部の力学的特性の低下は除外できます。

### ■ 硬さ試験と元素マッピング分析による硬さの局所的測定の評価

同じ減面率70%のラジアルフォーミング加工品同士を比較すると、先端側 (70-1) と根本側 (70-3) の内部側の測定値のバラつきが大きい傾向がみられました。この要因を調査するため、圧痕付近をEPMAを用いてマッピング分析をしました<sup>3)</sup>。1例として、圧痕付近で試験片表面の周囲が形状不良だった部位のマッピング像 (二次電子像とCの元素マッピング像) を図22に示します。二次電子像でみられる圧痕の周りのシフのような歪みの部位はCのX線強度が高い傾向がみられます。Cの偏析による硬さの違いにより、シフのような歪みが生じたと考えられます。

続けて減面率70% (70-1) の試験片の各元素分布を調査しました。硬さ分布を図23に示します (再掲)。この中で、

硬さ測定値が大きい点 (24mm) と小さい点 (20mm) があるエリアに注目しました。元素マッピング分析結果を図24~25に示します。図24ではCとCrの内部側 (表面から19~25mm) を拡大し、図25では圧痕付近を拡大しています。20mmの圧痕付近はCやCrのX線強度が低く、24mmの圧痕付近はCやCrのX線強度が高いことがわかります。これらから、硬さ測定値はCやCrの偏析の影響を受けていることが示唆されます。

以上から、硬度測定時の圧痕のくぼみ周辺にゆがみがみられたり、硬度の測定値のばらつきが大きい場合は主にCの偏析が原因と考えられることがわかりました。従って、硬度の測定値のばらつきの大小から、元素の偏析度合いを推測するという見方もできることがわかりました。

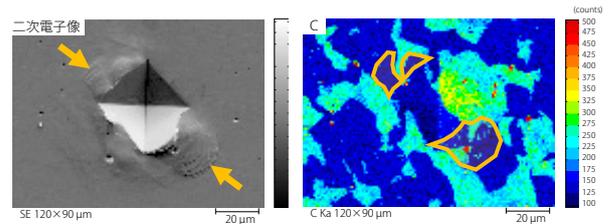


図22 形状不良くぼみの元素マッピング像

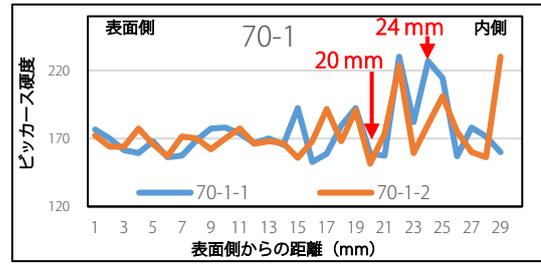


図23 ラジアルフォーミング加工品の硬さ測定結果 (減面率70%、70-1)

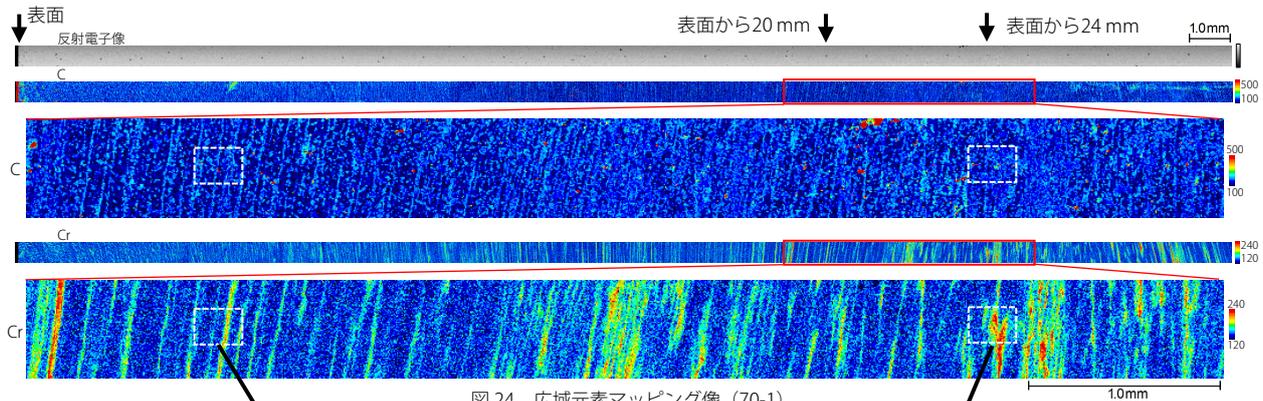


図24 広域元素マッピング像 (70-1)

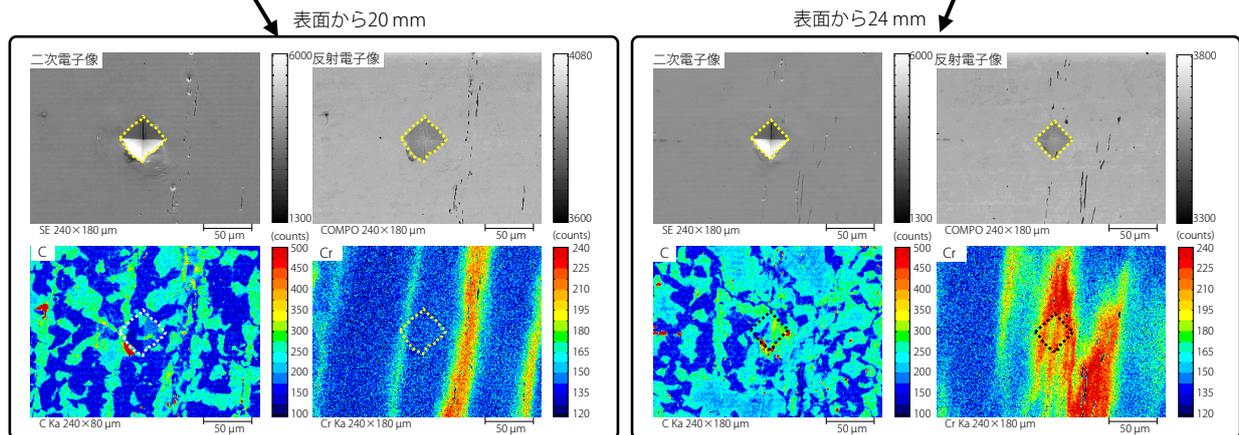


図25 図24の粹部の拡大マッピング像 (70-1)

## ■ ラジアルフォーシング加工品のTG-DTA測定

SCr420で作製された材料をラジアルフォーシングにより鍛造加工した2種類の試料を図26のDTG-60を用いて表6の測定条件のもとTG-DTA測定を行いました。試料50%より試料70%の方がハンマーによってより力がかえられており、加工度が大きい試料となっています。それぞれn=2で測定した結果を表7に示しています。図28と図29によると200℃から1000℃まで重量変化は見られず、770℃付近に吸熱ピークが見られました。



図 26 DTG-60



図 27 TMA-60

表 6 TG-DTA測定条件

装置	: 示差熱・熱重量同時測定装置 DTG-60
試料量	: 約392 mg
セル	: アルミナマクロセル
雰囲気	: 窒素
加熱速度	: 20 °C/min

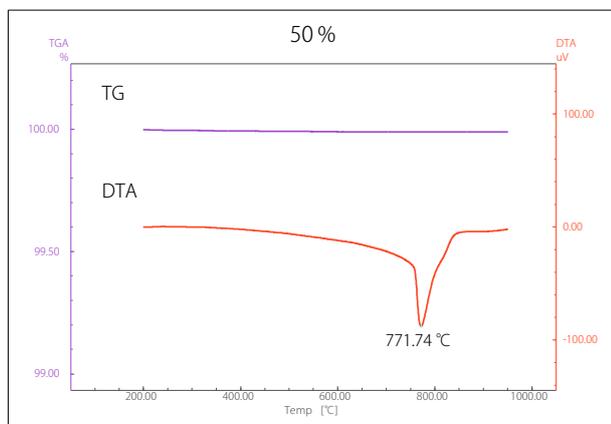


図 28 試料50%のTG-DTA曲線

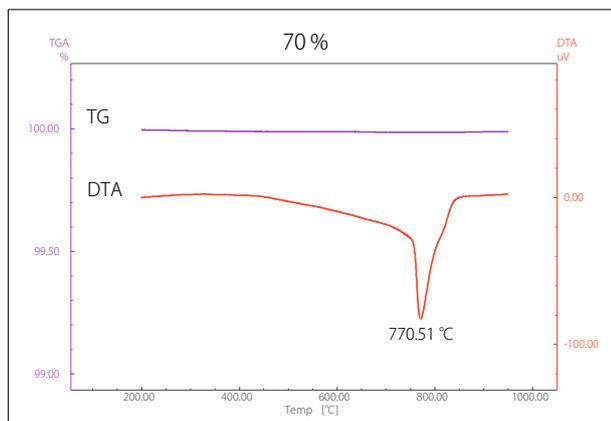


図 29 試料70%のTG-DTA曲線

表 7 TG-DTA測定結果

試料名	ピーク (°C)
50%_①	771.7
50%_②	771.6
50%_平均	771.6
70%_①	770.5
70%_②	770.4
70%_平均	770.5

## ■ ラジアルフォーシング加工品のTMA測定

SCr420で作製された材料をラジアルフォーシングにより鍛造加工した試料70%を図27のTMA-60を用いて表8の測定条件のもとTMA測定を行いました。図30のTMA曲線より790℃付近に変曲点が見られ、TG-DTA曲線に見られた吸熱反応は、相変態によるピークであると考えられます。変態温度が把握できると、変態温度より高温で鍛造加工すると組織が均一化し、変態温度より低温で鍛造加工すると組織が微細化するため、組織の均一化と微細化の線引きが可能になります。

表 8 TMA測定条件

装置	: 熱機械分析装置 TMA-60
試料長	: 2.592 mm
初期荷重	: 10 g
雰囲気	: 窒素
加熱速度	: 10 °C/min

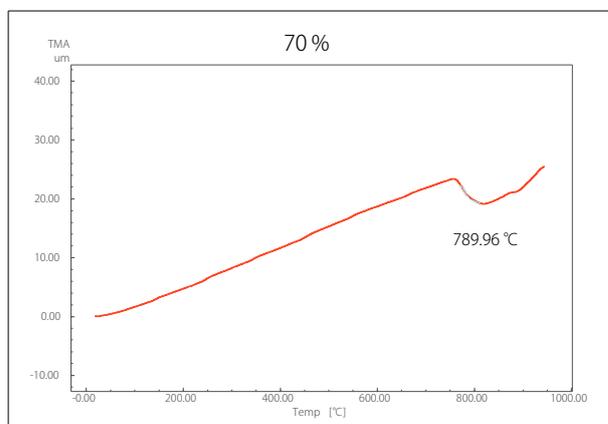


図 30 試料70%のTMA曲線

## ■ 熱特性評価と元素マッピング分析の比較

TG-DTA測定結果から、試料70%の方が試料50%よりも吸熱ピークトップ温度が低くなっています。また、EPMAによる元素マッピング分析の結果(図16、図17、図20、図21)から、試料50%よりも試料70%の方が加工により組織が細かくなっていることが確認されました。以上より、加工度が大きい試料70%の方がフェライト+パーライト相の結晶粒組織が加工により細かくなっており早く反応が起るため、吸熱ピークトップ温度が低くなっていると考えられます。

## ■ BLANK品とラジアルフォーミング加工品の比較のまとめ

精密万能試験機による力学的特性評価では、ラジアルフォーミング加工品は引張強さと弾性率の測定で向上がみられ、ポアソン比はほぼ一定の値となりました。一方で、ラジアルフォーミング加工品の内部側においては破断伸びが低下することもわかりました。

ビッカース硬さ測定では、BLANK品は表面と内部で硬さに違いがみられましたが、ラジアルフォーミング加工品ではほぼ一定となりました。ただし、ラジアルフォーミング加工品では鍛造による伸長方向の端の方では硬さの測定値にばらつきが目立ち、これは含有元素（主にC）の偏析による影響であることが示唆されました。

EPMAによる元素マッピング分析により、ラジアルフォーミング加工品は鍛造によって叩かれる方向の垂直方向に沿った組成分布（主にSi、Cr、Mn）の流れがみられ、鍛流線の観察でみられる流れと一致しました。また、微小部の元素マッピング分析により、ラジアルフォーミング加工品は、鍛造の加工度が大きいほど、より微細な結晶粒として析出していることがわかりました。

熱特性評価では、ラジアルフォーミング加工品は200℃から1000℃まで重量変化は見られず、770℃付近に吸熱ピークが見られました。また、TMA測定結果からこの吸熱反応は相変態によるピークであることがわかりました。さらに、同じラジアルフォーミング加工品でも加工度が大きい減面率70%の方が吸熱ピークトップ温度が低くなることがわかりました。これは、EPMAの元素マッピング分析結果と合わせて考えると、ラジアルフォーミング加工しながら冷却していく過程で「フェライト+パーライト」に相変態し、さらに鍛造加工の効果で結晶粒がより細くなっていることが要因であると考えられます。

以上から、各試験計測・分析装置による多角的評価により、ラジアルフォーミング加工による有効性を確認することができました。

## ■ 各試験計測・分析装置による多角的評価

以上から、精密万能試験機（図31）で力学的特性を、硬度計（図32）でビッカース硬さ測定を、EPMA（図33）で元素分布の測定や結晶方位の観察を、熱分析（図34、図35）で重量変化や吸熱反応の測定をすることにより、多角的に材料や製品を評価することが可能となります。また、優れた特性を示す加工領域を評価したり、鍛造加工条件や熱処理制御の条件を最適化するための評価ツールとしても期待できます。

### <参考文献>

- 1) 株式会社都筑製作所、シャフトの紹介  
<https://www.tsuzuki-mfg.co.jp/solution/2020/01/post-12.php>
- 2) アプリケーションニュース 01-00440-JP 「ラジアルフォーミング加工によるEV用モーターシャフトの評価 –ラジアルフォーミング加工が静的引張特性に及ぼす影響–」
- 3) アプリケーションニュース 01-00445-JP 「ラジアルフォーミング加工によるEV駆動用モーターシャフトの評価 –硬度分布と元素分布の相関確認–」
- 4) アプリケーションニュース01-00513-JP 「ラジアルフォーミング加工によるEV駆動用モーターシャフトの評価–EPMAによる元素マッピング分析–」



図31 精密万能試験機 AGX-V



図32 マイクロビッカース硬度計 HMV-G31-FA

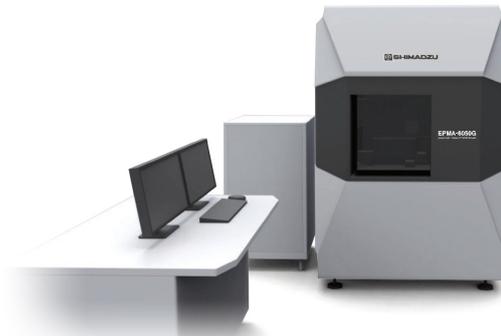


図33 電子線マイクロアナライザ EPMA-8050G



図34 DTG-60



図35 TMA-60

AGX、HMV、およびEPMAは、株式会社島津製作所またはその関係会社の日本およびその他の国における商標です。

## ＞ アンケート

**関連製品** 一部の製品は新しいモデルにアップデートされている場合があります。



＞ オートグラフ AGX-V2 シリーズ  
精密万能試験機



＞ オートグラフ AGX-V2 シリーズ  
精密万能試験機



＞ HMV-Gシリーズ  
マイクロビッカース硬度計



＞ EPMA-8050G  
電子線マイクロアナライザ(Electron Probe Microanalyzer)



＞ DTG-60/60Hシリーズ  
TG/DTA同時測定装置



＞ TMA-60/60H  
熱機械分析装置

## 関連分野

＞ 自動車

＞ 材料軽量化

＞ 価格お問い合わせ

＞ 製品お問い合わせ

＞ 技術お問い合わせ

＞ その他お問い合わせ