

## 径向锻造 EV 驱动电机轴的评估

— 使用 EPMA 进行元素分布分析 —

01-00513-CN

小野 卓男

### 特点描述

- ◆ 可以通过 EPMA 元素分析对径向锻造加工的中空轴进行加工技术和材料强度的评估。
- ◆ 可以掌握锻造流线造成的元素分布特征。
- ◆ 可通过夹杂物和析出相的元素分布，掌握材料的内部缺陷，并对提高强度进行评估。

### 简介

近年来，为实现温室气体的减排，正在加速推进低碳化进程。其中，汽车产业的电动汽车（EV）转型在为实现低碳社会发挥着重要的作用。普及 EV 化需要提高续航里程，车身的轻量化也成为开发主题之一。特别是 EV 驱动用电机轴的轻量化不仅可以增加续航里程，而且有望通过抑制惯性提高电机的响应性能，因此成为重要的开发主题之一。径向锻造加工是一种中空轴的新型锻造技术，通过锻造锤（模具）在中空轴的径向施加力量，同时插入模芯，形成内径形状，实现内外径的同时成型<sup>1)</sup>。采用径向锻造加工方法的中空轴是一种兼具强度和轻量化的产品，作为下一代轴而受到广泛关注。

作为对其他报告<sup>2)、3)、4)</sup>中介绍的径向锻造加工电机轴的多维度评估一个组成部分，本稿聚焦于夹杂物和微小析出物，介绍使用电子探针显微分析仪 EPMA-8050G 进行元素分布分析的应用事例。

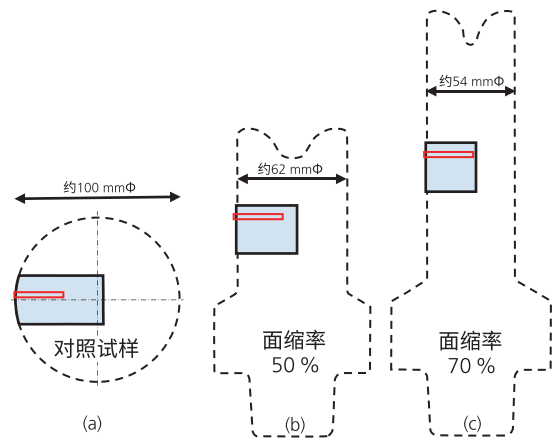


图 1 试验片的切下位置和测定位置  
(a) 对照试样 (b) 径向锻造加工样 (面缩率 50%)  
(c) 径向锻造加工样 (面缩率 70%)

(样品由株式会社都筑制作所提供)

### 试验片的观察和广域分布分析

材料为 SCr420，从未加工（对照试样）和径向锻造加工试样的两种（面缩率 50%、70%）产品上切下，并进行了表面研磨。面缩率是指锻造前后的截面积变化比例。对照试样和径向锻造加工样（面缩率 50%、70%）的切下位置用图 1 的涂色部分表示。图 2、图 3 是对面缩率 50% 的同等加工产品的截面进行化学处理，对锻造流线进行观察的照片。图 3 的箭头部分与图 4 所示的元素分布像的 Cr 分布叠加。在图 2、图 3 中看到的锻造流线的流向与 Si/Cr/Mn 的元素分布高度一致。图 4 的表面附近是微细结构，深部是较粗、浓淡差较大的结构流向。如上所述，锻造后变微细的锻造流线在光学显微镜观察时不清晰，而通过 EPMA 的高分辨率可以进行清晰观察。

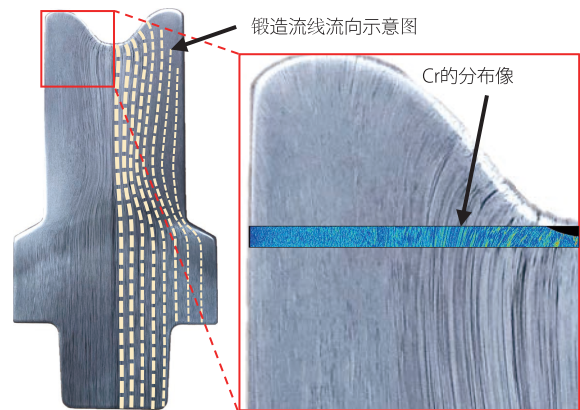


图 2 面缩率 50% 截面的锻造流线观察照片

图 3 锻造流线观察照片的放大和 Cr 的分布像

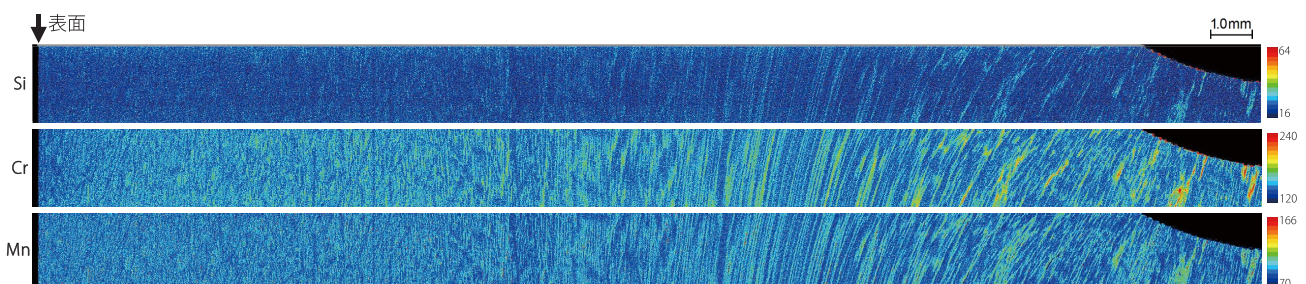


图 4 径向锻造加工样（面缩率 50%）的元素分布像（相当于图 3 的黑框部分）

## ■ 初始未加工对照试样与径向锻造加工试样的比较 ~表面与内部结构和夹杂物~

图 1 的对照试样和径向锻造加工试样（面缩率 70 %）的红框广域元素分布分析结果如图 5、图 7 所示，各表面附近和距离表面约 24 mm 的内部狭域元素分布分析结果如图 6、图 8 所示。从图 7、图 8 来看，径向锻造加工试样的 Si、Cr、Mn 呈沿表面和平行方向分布的成分流向。另外，该流向看不到图 4 所示的波纹，呈一个方向。推测出现该现象的原因是，和图 2、图 3 的锻造

流线的流向一样，结构的流向因切下位置的不同而异。在背向散射电子图像中，获得了反映基于通道衬度的晶体取向的图像，可以观察到晶粒在加工后变细的趋势。通过 C 分布比较可知，径向锻造加工试样的结构比对照试样更加微细。S 与 Mn 的富集部分分布相同，可见形成了 MnS 夹杂物。另外，径向锻造加工试样在表面锻造方向的垂直方向被压扁，呈细长形，内部形成大块。

这是因为，被加热的材料在进行径向锻造加工的过程中会自然冷却，由于热效应的影响，内部逐渐发生结构变化，偏析进一步发展，锻造效果在表面附近比内部更大。因此，可以推测结构的微细化加剧。

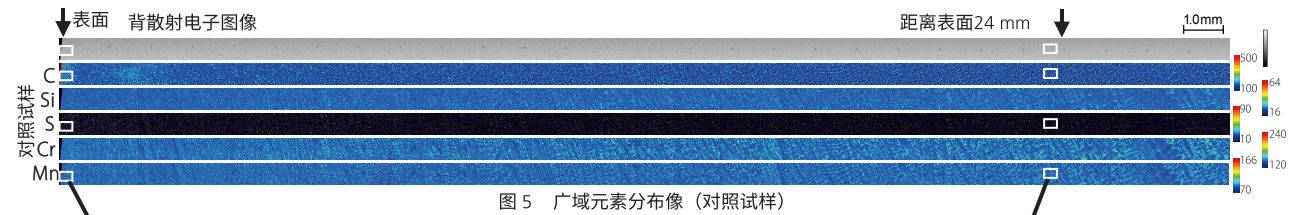


图 5 广域元素分布像 (对照试样)

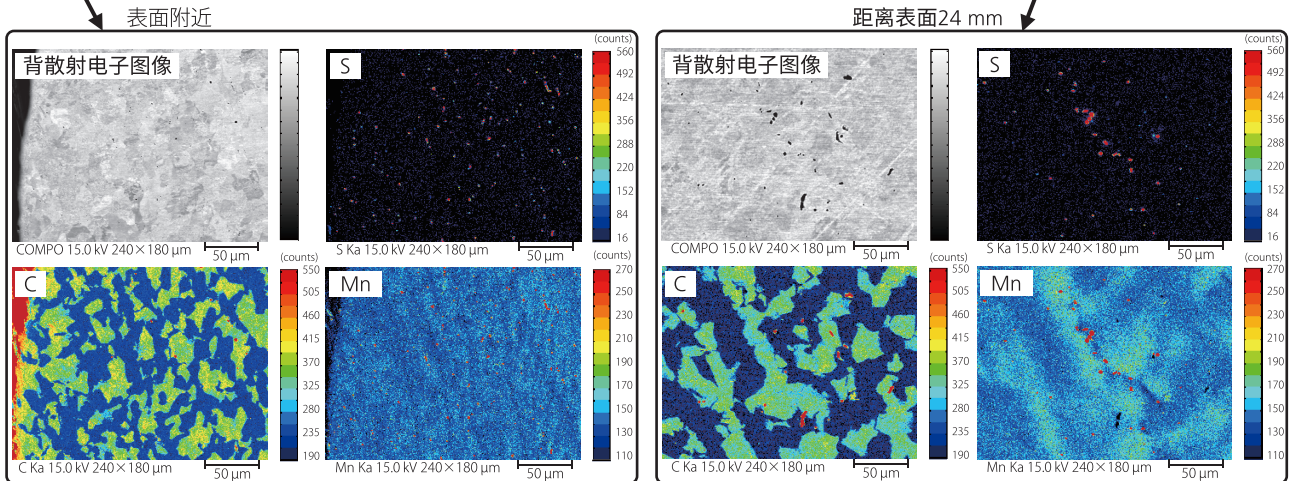


图 6 狭域元素分布像 (对照试样)

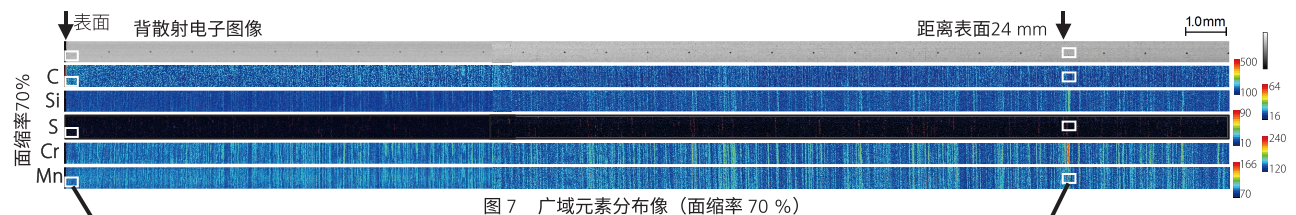


图 7 广域元素分布像 (面缩率 70 %)

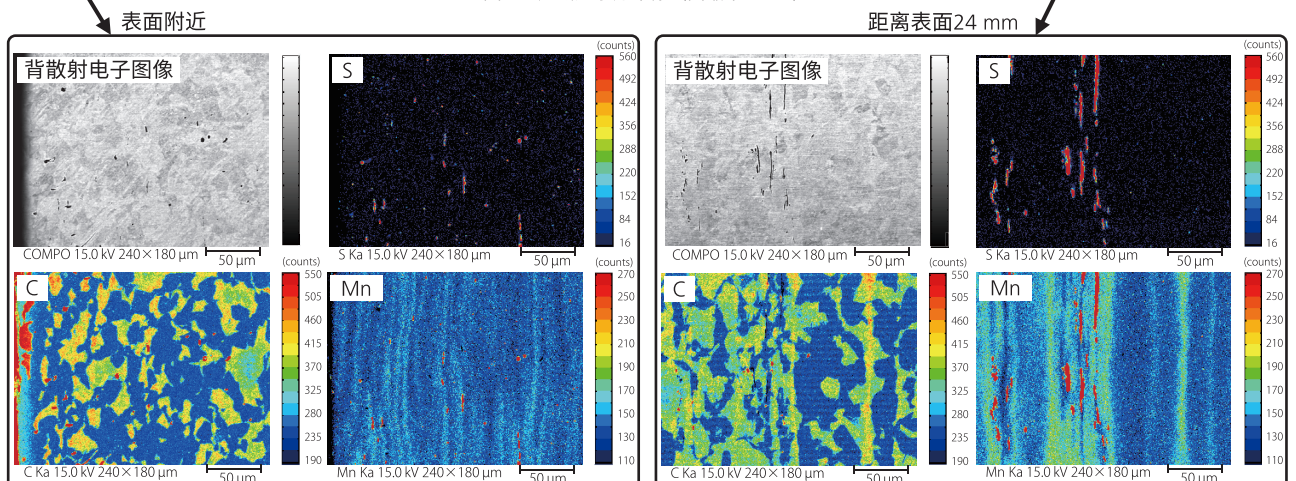


图 8 狭域元素分布像 (面缩率 70 %)

## 对照试样与径向锻造加工试样的比较 ~ 珠光体结构与晶界 ~

将图 1 的 (a) 对照试样、(b) 面缩率 50 %、(c) 面缩率 70 % 的试样的表面附近分别放大的元素分布分析结果如图 9 所示。通过 C 的分布，可以看到层状的细珠光体结构（铁素体（ $\alpha$  铁）和渗碳体（ $\text{Fe}_3\text{C}$ ）的两个背散射电子图像相分离的结构）。此外，对图 9 的面缩率 70 % 的区域放大后（图 10）发现，图 9 中的

岛状分布也是微细的珠光体，与对照试样和面缩率 50 % 的部分相比，具有层间隔更小的趋势。

通常，珠光体的层间隔越小，表示强度越大，推测为锻造加工的效果。从 Cr 的分布来看，形成了晶界，由于其边界的 Cr 富集部分和 N 的分布一致，可知形成了 Cr 氮化物。与对照试样相比，径向锻造加工样品的 Cr 氮化物也有更加微细的趋势，推测为锻造加工的效果。另外，在图 10 的分布中，Cr 与 C 的分布一致，可知还形成了 Cr 的碳化物。

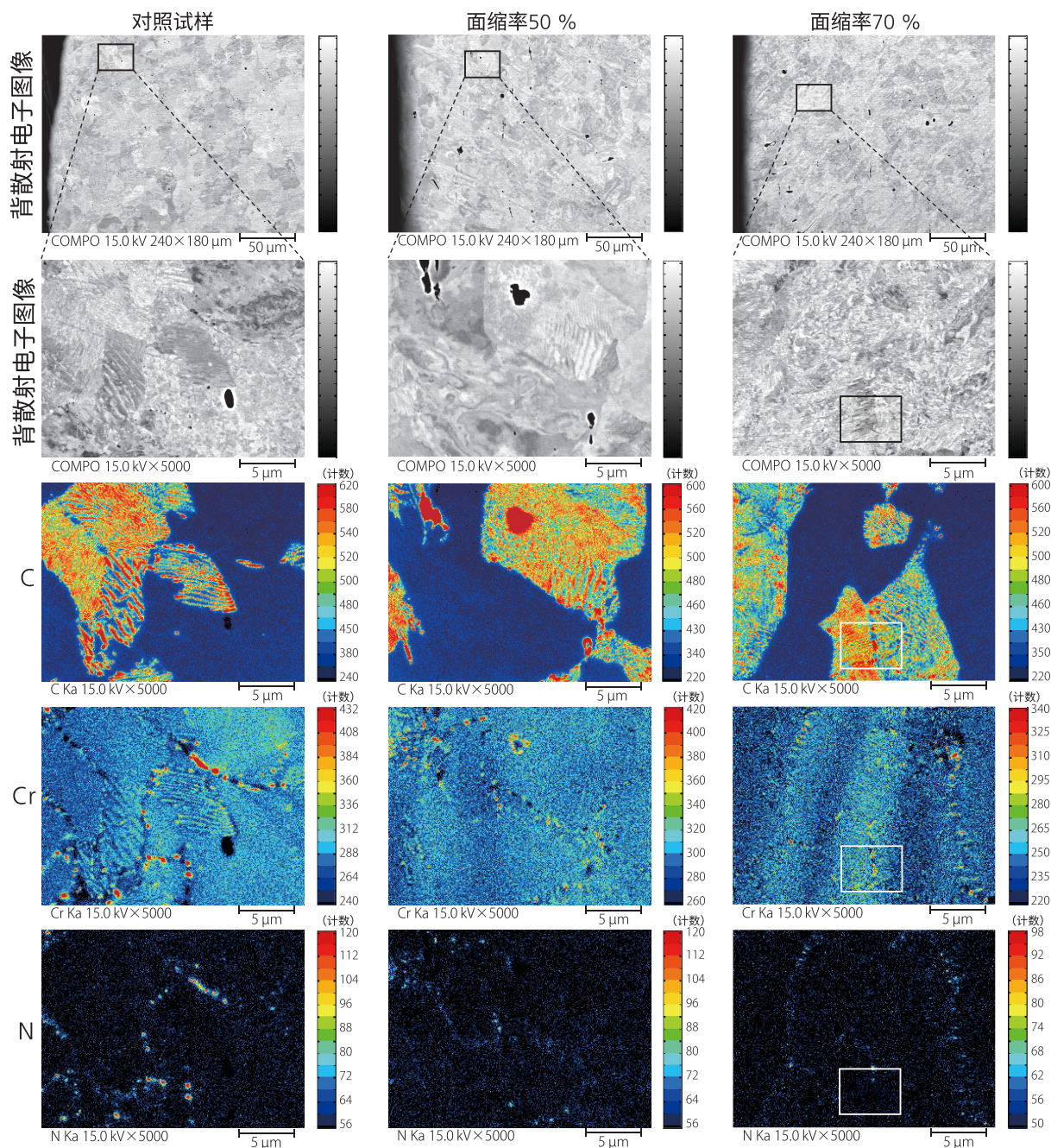


图 9 各试样的表面附近元素分布像

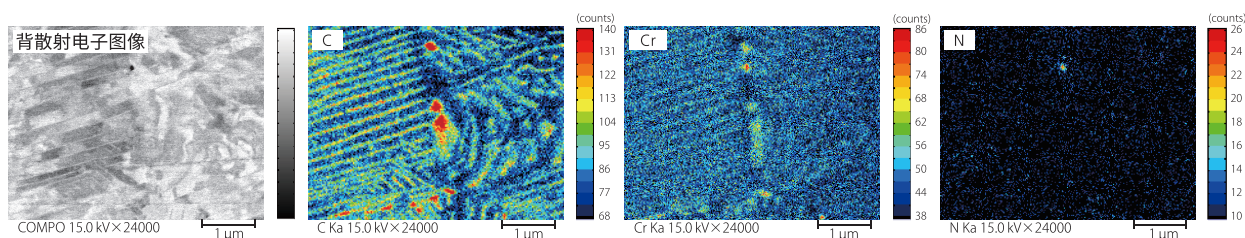


图 10 面缩率 70 % 的表面附近的元素分布像（图 9 的框部放大）

## 微小的析出物 / 化合物的元素分布

用高倍率对径向锻造加工样（70 %）的表面附近进行了元素分布分析。对图 8 的表面附近区域放大后的元素分布分析结果如图 11 所示，将两个区域放大后的元素分布分析结果如图 12、图 13 所示。从图 11 的 Cr 的分布来看，未析出 C 的区域也有 Cr 富集的地方（图 11 的红框），从对其放大的图 12 来看，与 N 的分布一致，因此，推测为作为 Cr 的氮化物析出。另外，图 13 在微小区域检测到了 S、Mn、N、Al，叠加图像显示 MnS（硫化锰）和 AlN（氮化铝）相邻形成。

## 结论

通过使用 EPMA 进行金属材料的元素分布分析，可以掌握使用光学显微镜无法获知的形成锻造流线的元素、调查夹杂物的分布和形状等，以及确认微细的析出物和化合物的形成，为掌握材料的内部缺陷和提高产品制造过程中的材料强度提供数据支持。

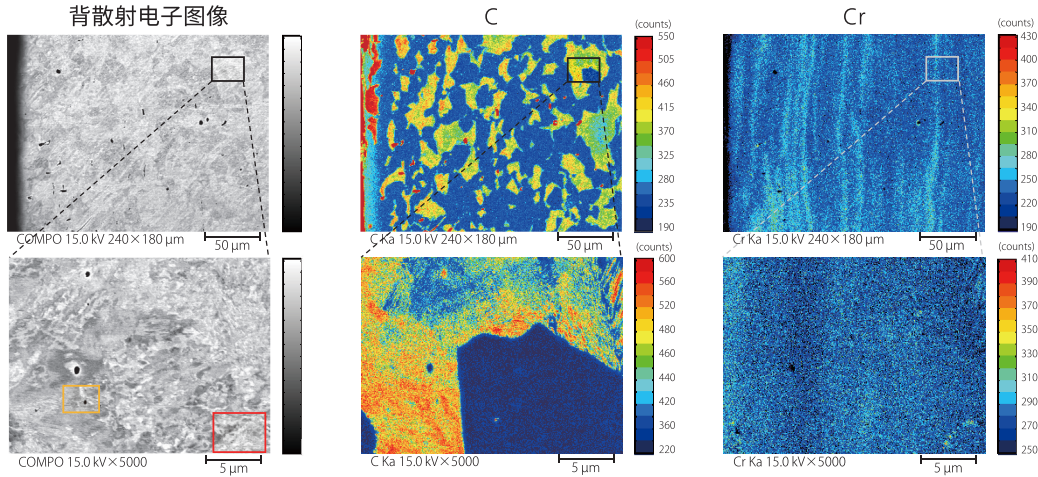


图 11 面缩率 70 % 的表面附近的元素分布像

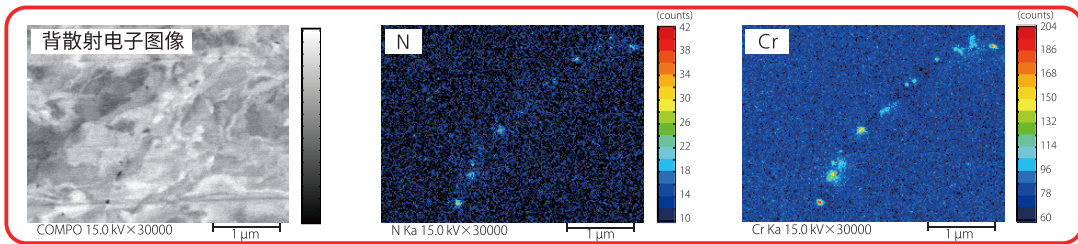


图 12 面缩率 70 % 的表面附近的高倍率元素分布像（图 11 的红框部分放大）

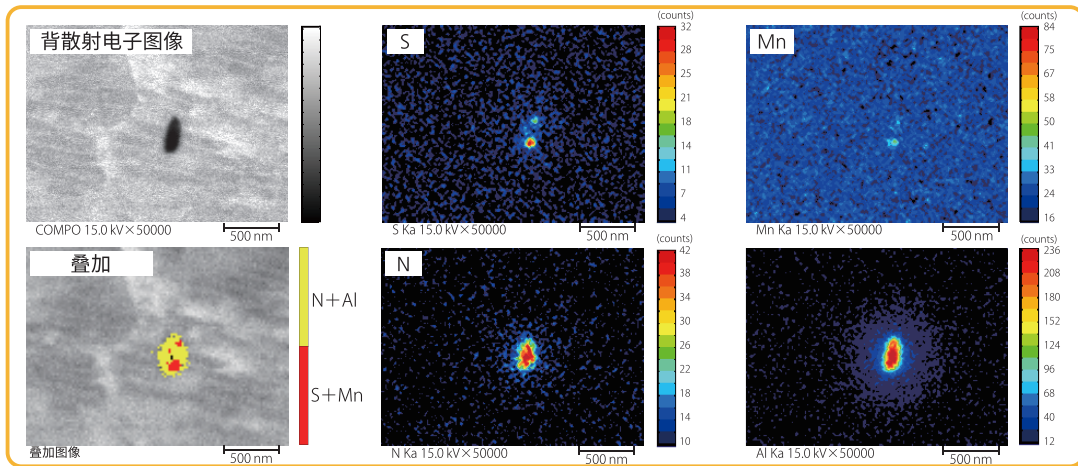


图 13 面缩率 70 % 的表面附近的高倍率元素分布像（图 11 的橙框部分放大）

< 参考文献 >

- 1) 株式会社都筑制作所、轴的介绍  
<https://www.tsuzuki-mfg.co.jp/solution/2020/01/post-12.php>
- 2) 应用新闻 01-00440-JP
- 3) 应用新闻 01-00445-JP
- 4) 应用新闻 01-00506-JP

EPMA 是岛津制作所株式会社或其相关公司在日本及其他国家 / 地区的商标。

岛津应用云



岛津企业管理（中国）有限公司  
岛津（香港）有限公司

<http://www.shimadzu.com.cn>

用户服务热线电话：800-810-0439  
400-650-0439

免责声明：

※ 本资料未经许可不得擅自修改、转载、销售；  
※ 本资料中的所有信息仅供参考，不予任何保证。  
如有变动，恕不另行通知。

第一版发行日：2023 年 03 月