

钛材料具有耐腐蚀和耐热等机械性能，被应用于从航空航天到消费品的各个领域。可作为通用材料应用于液体燃料箱、飞机发动机和自行车齿轮等，还可作为特殊材料应用于眼镜框、齿列矫正线等。

通用材料又细分为三种：耐腐蚀性和耐海水性能优异的、最常见的高纯度工业纯钛（CP 钛），添加了微量元素以促进钝化膜形成的、耐腐蚀性优良的耐腐蚀钛合金，以及添加了合金元素以调节可加工性和强度等特性的钛合金。另外，特殊材料大致分为纯度比纯钛高的高纯度钛，以及添加到钛合金中具有独特功能的形状记忆合金、超弹性合金等功能性钛合金。

钛材料由于其优异的生物相容性也被应用于医学领域，现在正在研究开发危害较小的钛合金。

本文介绍了使用电子探针显微分析仪 EPMA™（EPMA-8050G）对医用钛材制成的牙根植入物和具有超弹性特性的齿列矫正线进行分析的示例。

S. Yoshimi

■ 钛合金分析

钛在室温下为 α 相（密排六方结构：HCP），在 885°C 以上同素转变为 β 相（体心立方结构：BCC）晶体结构。可以通过添加 α 相稳定元素 Al、O、N、C 等和 β 相稳定元素 V、Mo、Nb、Fe、Cr、Ni 等来调节结构，从而制成具有各种性能的合金。这些合金分为 α 合金、 α - β 合金和 β 合金。

α 合金的典型示例是 Ti-5Al-2.5Sn 合金，该合金具有出色的焊接性和高温强度（蠕变特性），在极度低温下也具有出色的延展性和韧性，可用于液体燃料箱制造。

β 合金的特征在于在常温下具有 β 相结构，因此在固溶处理状态下（通过热处理强化前）的加工性能优异，通过固溶时效处理，可获得钛合金中的最高强度，用于高尔夫球头等的制造。

α - β 合金的典型示例是 Ti-6Al-4V 合金，是平衡兼备 α 合金和 β 合金特征的合金。这种合金也被称作 6-4 钛，它具有出色的加工性能和焊接性能，可以通过热处理进行强化，广泛用于从飞机到普通消费品的制造中。

EPMA 对 Ti-6Al-4V 合金的牙根植入物分析的结果，可确认 α 相稳定元素的 Al 和 β 相稳定元素的 V、Fe 的分布状态，见图 1。

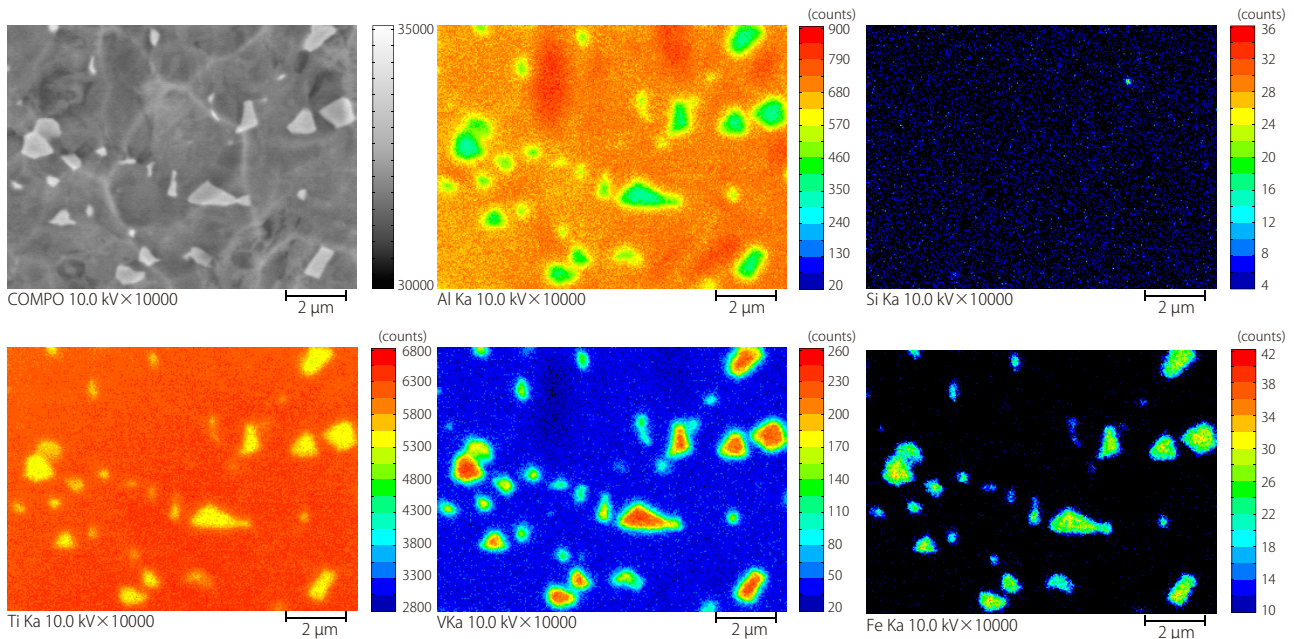


图 1 牙根植入物分析

超弹性合金

以50%的原子比混合的Ti和Ni合金称为TiNi合金（镍钛诺），因其出色的形状记忆特性和超弹性特性而广为人知。将形状记忆合金变形为任意形状后，当加热到相变温度（相变点）以上，合金会恢复到原始形状；超弹性合金在施加负荷时会变形，而去除负荷后则会恢复到原始形状。可以通过改变Ti和Ni的混合比来改变相变温度，还可以通过添加其他元素来改变特性。

图2显示了作为超弹性合金的齿列矫正线的元素面分析结果，其中在TiNi合金基体相中观察到O和Ti集中的数μm大小的化合物相呈弥散结构分布。

图3为化合物相放大后的元素面分析结果，可以确认约300nm的微细球形颗粒。TiNi合金基体的Ti和Ni浓度分别约为46wt%和54wt%，原子比接近1:1。化合物相中的O、Ti和Ni浓度分别约为4.6wt%、59.7wt%和35.7wt%，原子比接近1:4:2。

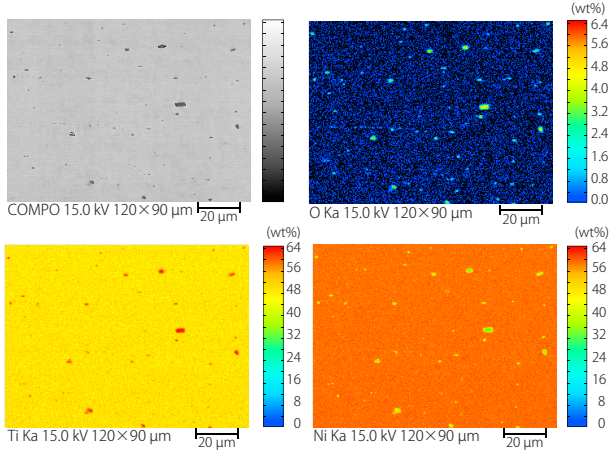


图2 齿列矫正线分析

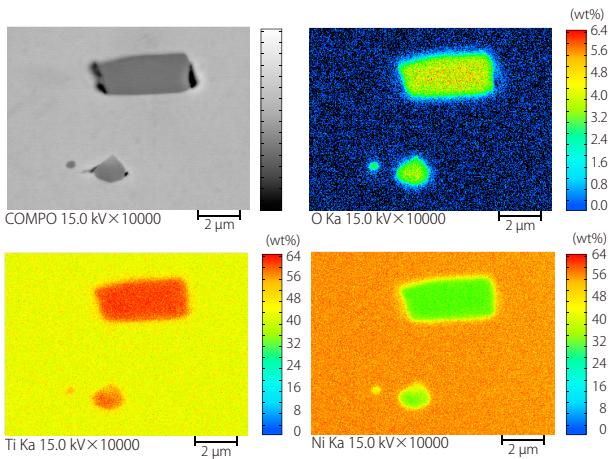


图3 TiNi合金和Ti₄Ni₂O的化合物相

化合物相的相解析

通过相分析，能将绘制在散点图上的强度（浓度）作为点集（簇）提取，因此可以准确地显示化合物相。通过对图3中的O、Ti、Ni元素面分析数据进行相位分析，可获得的图4中，O、Ti、Ni的三维散点图。从图中可以确认两个簇，并且Ti₄Ni₂O化合物的显示位置（O:Ti:Ni=4:59:37wt%=13:58:29at%）和簇中心相对应。过滤每个簇后获得了图5所示的相图，分离为TiNi基体相和Ti₄Ni₂O化合物相。

图6的多元素散点图显示了基体相的TiNi合金以及化合物相的Ti₄Ni₂O化合物。可以在O、Ti和Ni的二维散点图中分别看到簇中心和化合物显示位置相一致。

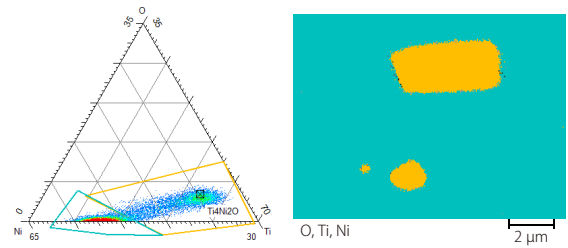


图4 三元素散点图

图5 相图

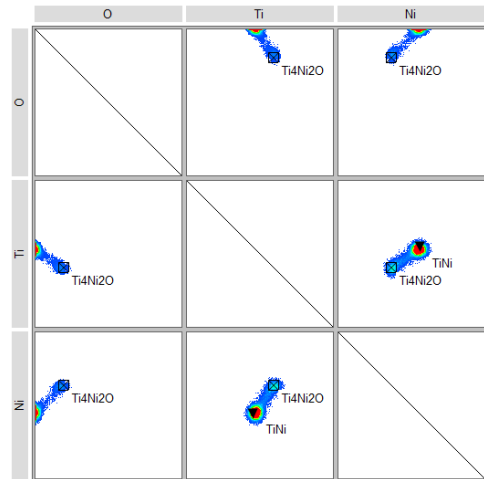


图6 多元素散点图

化合物相的状态分析

EPMA可以进行微区的状态分析，已经知道可以使用Ni-L线系根据Ni-Lβ/Ni-Lα的比率（Ratio）和峰型波长偏移等来对镍进行分析。图7所示的Ti₄Ni₂O化合物相的Ni-L线系谱表明有化合物形成，因为其峰型波长和比率与纯镍略有不同。

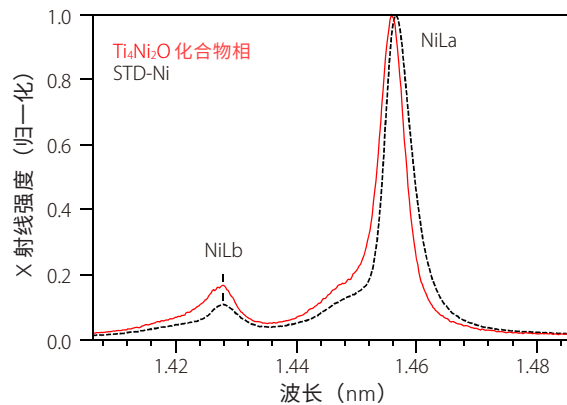


图7 Ni的状态分析

<参考文献>

（社）日本钛协会，现场活用金属材料系列 钛（2007）
EPMA是岛津制作所株式会社在日本及其他国家的商标。

岛津应用云

