

## WPC 技術とは

いわゆるショットピーニングは機械部品等の表面に圧縮残留応力を付与して疲労強度を向上する技術として広く普及しています。一方、WPC 処理は従来のショットピーニングよりも格段に微細な直径数十 $\mu\text{m}$ 程度の粒子を100m/sec以上の高速で投射する一種のショットピーニングです。ただし、微粒子を用いることから、従来のショットピーニングでは顕在化しなかった様々な現象が部品等の表面近傍で起こります。このことが、WPC 処理が従来のショットピーニングとは異なり一種の表面改質プロセスと位置づけられる理由です。

これらの現象を挙げると、以下のようになります。

- ① 大きな圧縮残留応力の付与
- ② 表面粗さの微細な制御
- ③ 基材表面へのコーティング
- ④ 基材表面近傍の高硬化化、ナノ結晶化
- ⑤ 基材表面近傍の複合組織化

以下、これらの現象について個々に解説します。

### ① 大きな圧縮残留応力の付与

図1は圧縮残留応力の発生原理を示したものです。粒子が衝突すると基材表面近傍の領域は塑性変形して引き伸ばされようとします。しかし、実際には相対的に大きな体積を占める基材の内部によって拘束されるために伸びることができません。この拘束による反力として圧縮方向の残留応力が発生することになります。そのため表面に大きな塑性変形が加えられるほど発生する圧縮残留応力も大きな値になります。図2に SCr420 浸炭焼入鋼に WPC 処理を施した時の圧縮残留応力の深さ方向分布を従来型ショットピーニングの場合と比較して示します<sup>(1)</sup>。従来型のショットピーニングと比較して WPC 処理の方がより表面の近くに大きな圧縮残留応力が付与されていることがわかります。このことは、WPC 処理によって表面の近くにより大きな塑性変形が起こっていることを示唆しています。

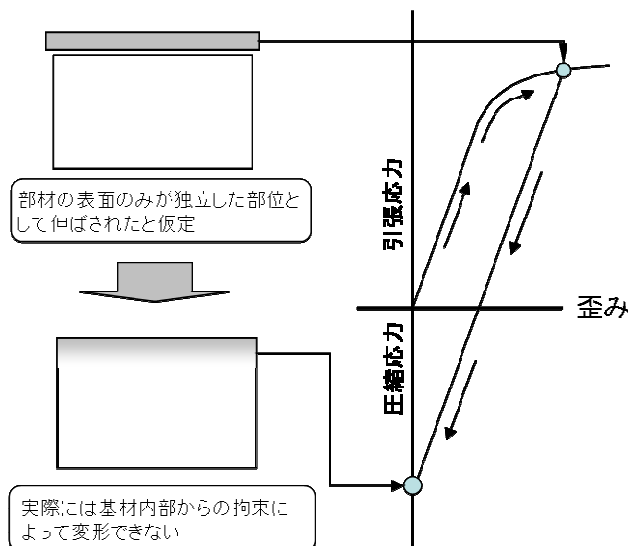


図1 圧縮残留応力の発生概念図

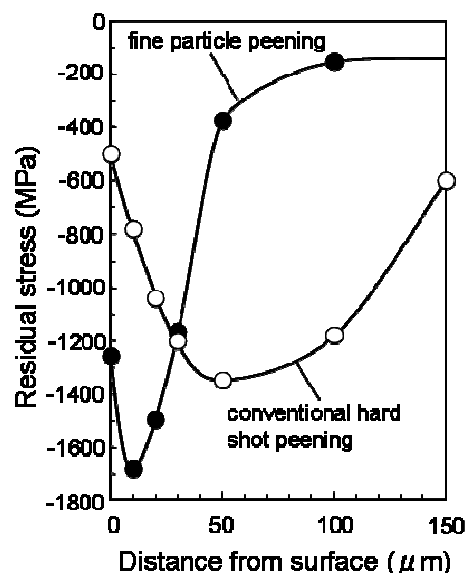


図2 微粒子ピーニングによる圧縮残留応力分布<sup>(1)</sup>

## ② 表面粗さの微細な制御

WPC 処理は微細な粒子を用いるので、適切な投射条件を選択すれば表面に微細かつ均一なくぼみ（マイクロディンプル）を形成させることが可能になります。図3はステンレス鋼（SUS304）鋼の表面に平均粒径が $45\mu\text{m}$ のセラミックス粒子を投射した場合の表面の様子を示したものです。WPC 処理によって機械加工痕が消滅し、深さがサブミクロンサイズのマイクロディンプルが表面全体を覆っていることがわかります<sup>(1)</sup>。また、図4はWPC処理した工具鋼の表面を走査型電子顕微鏡により観察した結果です。この場合もマイクロディンプルによって滑らかなくぼみが形成されていることがわかります。これらのマイクロディンプルによって摺動面は面接触から多数の点接触に変化し摩擦抵抗を大幅に低減することがわかっています。また、潤滑油を用いる場合にはマイクロディンプルが油溜まりの役割を果たして局所的な油切れによる凝着を抑制してくれます。

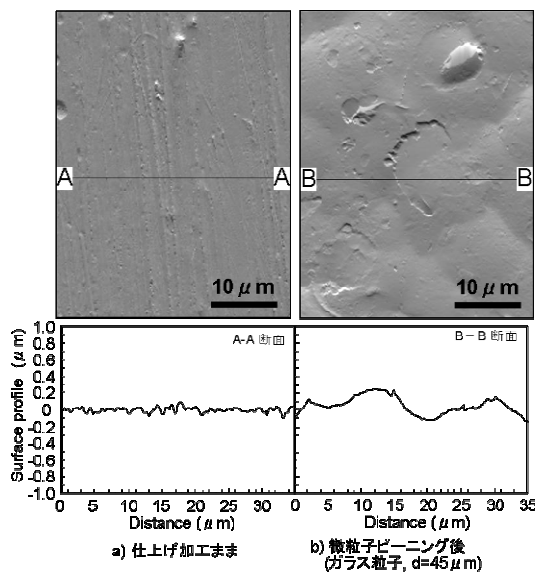
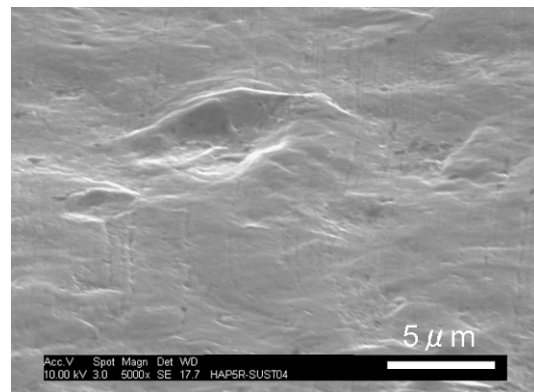


図3 ステンレス鋼表面へのマイクロディンプル形成例<sup>(1)</sup>



Ra :  $0.1851\ \mu\text{m}$

Rz :  $1.5924\ \mu\text{m}$

図4 金型用鋼表面へのマイクロディンプル形成例

## ③ 基材表面へのコーティング

WPC 処理は投射粒子の材質の選択によって基材表面に異種材料を機械的にコーティングすることも可能です。図5は軸受鋼（SUJ2）の表面にSnを投射した例です。硬いSUJ2に対して軟らかいSnを投射すると、Snが表面に付着するようにコーティングされます<sup>(1)</sup>。潤滑油を嫌う摺動面の摩擦係数低減に実用されています。また、二硫化モリブデン（ $\text{MoS}_2$ ）を自動車エンジン用ピストンのスカート部に投射して摩擦摩耗特性を向上させる手法も既に実用化されています<sup>(1)</sup>。

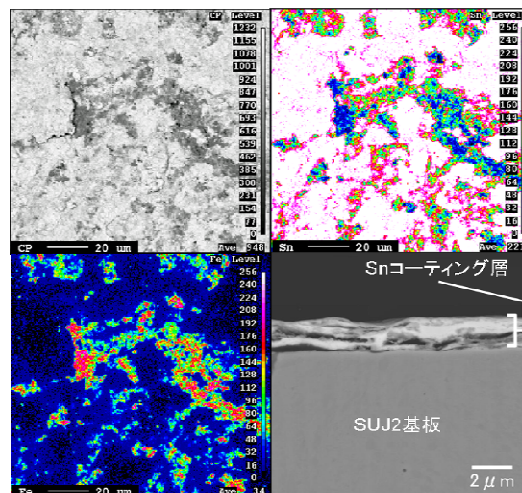


図5 SUJ2 鋼の表面にコーティングされたSn<sup>(1)</sup>

#### ④ 基材表面近傍の高硬化化、ナノ結晶化

WPC 処理によって基材表面近傍が塑性変形することは既に説明しました。この現象はちょうど鋼を鍛錬することによって、結晶粒が微細化してより強靱な鋼に変身するのと似ています。基材表面近傍では次々と打ち付けられる微粒子によって多段、多方向の鍛錬が繰り返り起こっているわけです。私たちはこれをマイクロフォーシング（微小な鍛造）効果と呼んでいます。しかも、マイクロフォーシングで与えられる塑性ひずみの大きさは従来の圧延や鍛造プロセスにおけるひずみの大きさとは比べものにならないほど大きいと考えられます。

1990年代の後半になって、結晶粒径を格段に微細化してこれまでの常識を覆す強靱な鉄鋼材料を開発しようという研究が盛んになっています<sup>(2)-(22)</sup>。大手素材メーカーや大学、公的研究機関の研究者たちが塑性ひずみと結晶粒径の関連を研究した結果、極めて大きな塑性ひずみを与えるとナノ結晶組織<sup>※1</sup>が形成されることが明らかになりました<sup>(10)-(22)</sup>。ナノ結晶組織の形成機構は、極めて大きな塑性歪みの導入による一種の再結晶であると理解されています<sup>(4)</sup>。ナノ結晶組織を得るには、極めて大きな塑性ひずみを付与できる手段を工夫しなければなりません。これまでに、メカニカルミリング法<sup>(10)</sup>、落錘法<sup>(11)</sup>、ドリル加工<sup>(12)</sup>などによる切削加工面などでナノ結晶組織が観察できることが報告されています。そして、これらに加えてショットピーニングによってもナノ結晶組織が得られることが明らかになっているのです<sup>(13)-(22)</sup>。いずれの方法によるナノ結晶組織も極めて高い強度を示します。例えば、メカニカルミリング法によって得られた平均結晶粒径が約20nmの純鉄はピッカース硬さがHV950という高速度鋼並みの硬さに達するという報告もあります。このような高強度化のメカニズムは塑性加工による加工硬化ではなく、ナノ結晶化による結晶粒微細化強化であると理解されています。

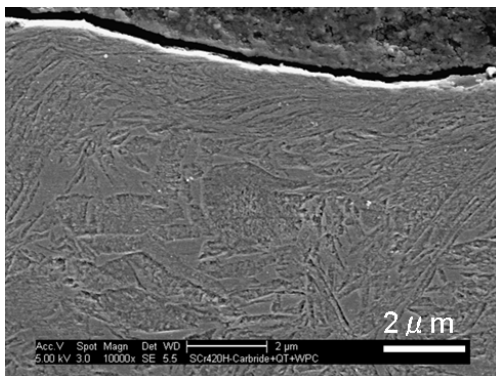


図6 高速度鋼を投射したSCr420浸炭焼入れ鋼表面の組織（SEM二次電子像）<sup>(15)</sup>。

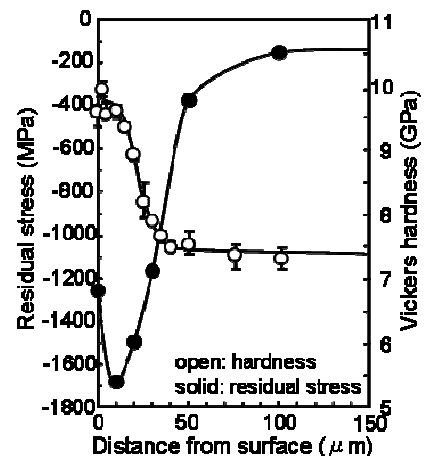


図7 高速度鋼を投射したSCr420浸炭焼入れ鋼表面の硬さおよび残留応力分布。

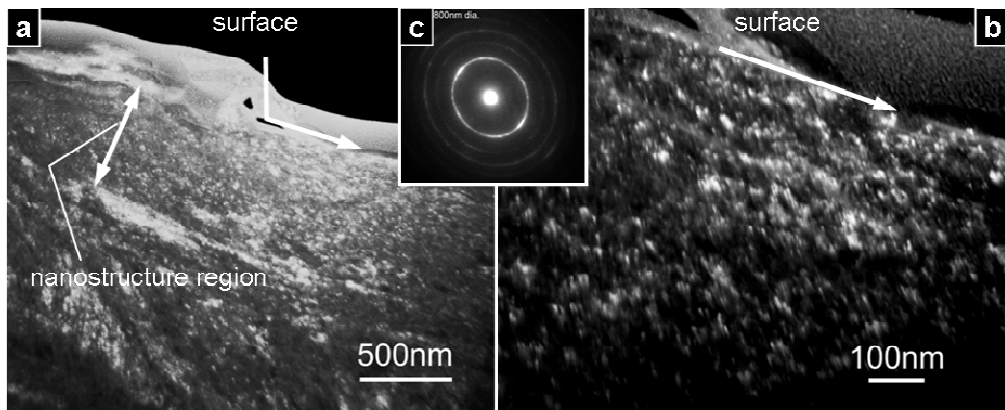


図8 高速度鋼を投射したSCr420浸炭焼入れ鋼表面近傍の透過型電子顕微鏡像<sup>(15)</sup>。  
a) 暗視野像（低倍率）、b) 暗視野像（高倍率）、c) 制限視野回折図形（視野直径0.8 μm）

WPC 処理はマイクロフォーミング効果によって基材表面の近傍に極めて大きな歪みを容易に付与することが可能な処理ですからナノ結晶組織を付与する手段としても有効です。図 6~8 に SCr420 浸炭焼入鋼の表面に WPC 処理を施した場合に形成されるナノ結晶組織を観察した例を示します<sup>(15)</sup>。走査型電子顕微鏡 (SEM) による二次電子像 (図 6) では、焼入れによって生成したマルテンサイト組織が塑性変形しているように見えるだけですが、透過型電子顕微鏡 (TEM) を用いて観察すると (図 8)、表面付近に約 500nm の厚さでナノ結晶組織が形成されています。また、図 7 に示すように、元々 HV750 の高い硬度を持つ材料の表面近傍は 10.5GPa (HV1000) 程度にまで高硬度化しています。さらに、圧縮残留応力も 1700MPa にまで達しています。WPC による表面近傍のナノ結晶化は浸炭焼入れ鋼だけでなく、図 9~14 に示すように、各種の工具鋼においても確認されています。高い圧縮残留応力の付与や表面の高硬度化、マイクロディンプルの形成が相まって金型等の長寿命化に寄与することが期待されます。

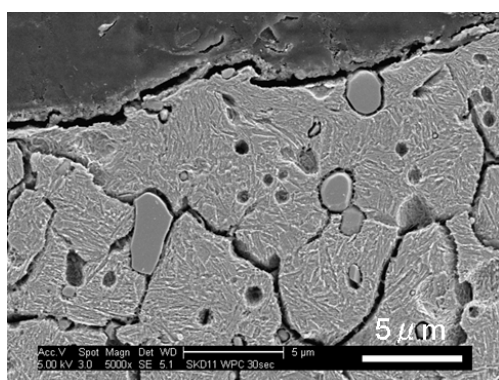


図 9 表面近傍の二次電子像

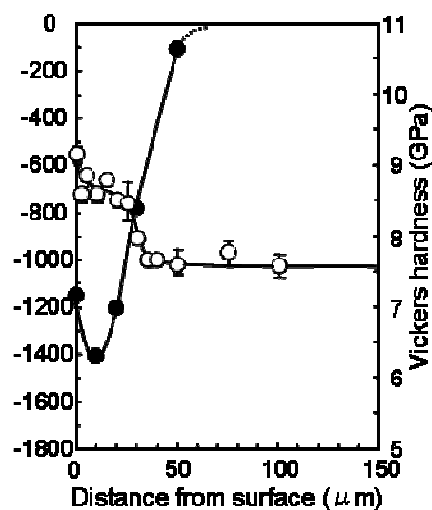


図 10 硬さおよび圧縮残留応力分布

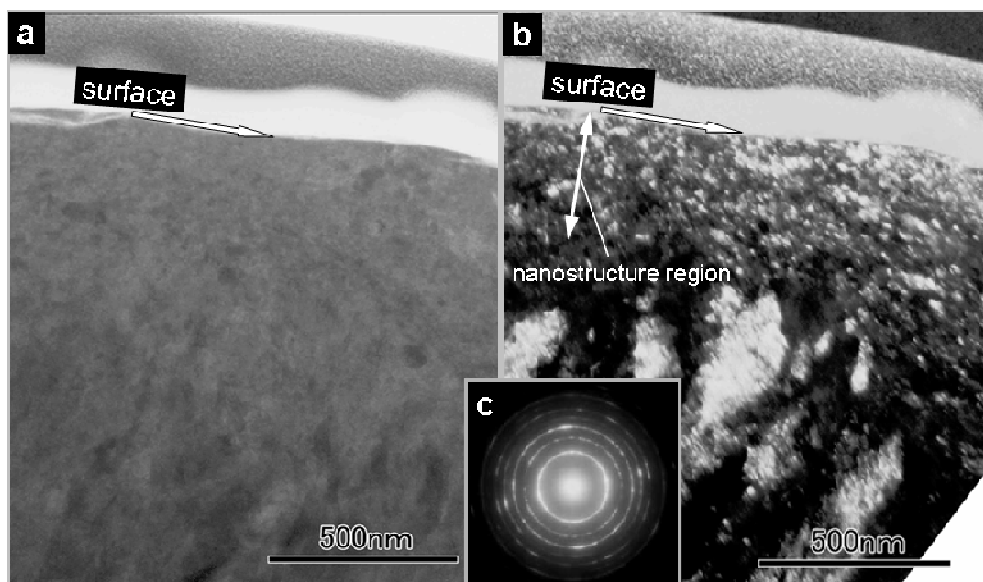


図 11 表面近傍の透過型電子顕微鏡像

a) 明視野像、b) 暗視野像、c) 制限視野回折図形(視野直径0.8 μm)



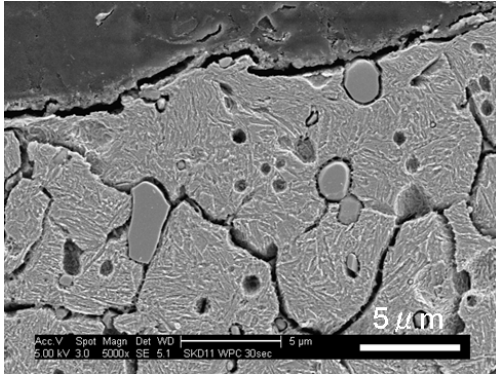


図1 2 表面近傍の二次電子像

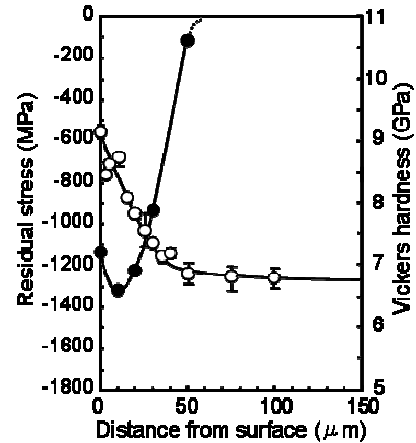


図1 3 硬さおよび圧縮残留応力分布

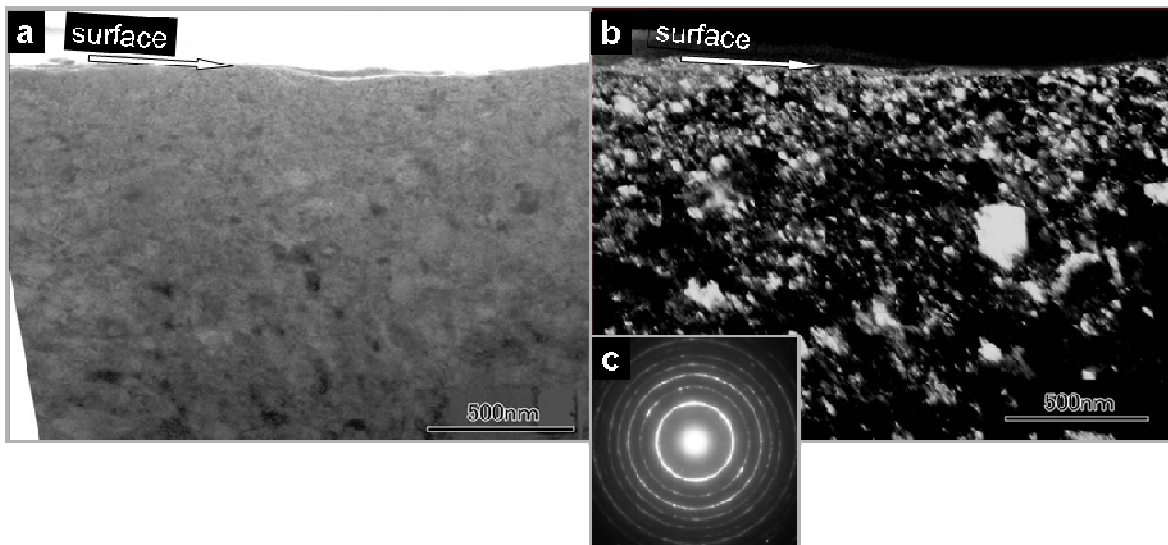


図1 4 表面近傍の透過型電子顕微鏡像

a) 明視野像、b) 暗視野像、c) 制限視野回折図形(視野直径0.8 μm)

### ⑤ 基材表面近傍のナノ複合組織化

ある種の金属に WPC 処理を施すと、投射した材料が微細に分散したナノ複合組織を創製することができます。図1 5は工業用純アルミニウム (A1070) に炭素鋼の粒子を投射した時の表面近傍の断面を光学顕微鏡により観察した例です。表面に凹凸が形成されていることに加えて、灰色に見える組織が形成されています。この灰色の部分走査型電子顕微鏡による組成像で拡大して観察すると、白色の粒子が微細に分散している様子がわかります(図1 6)。組成像では重い元素ほど白く観察されることから、アルミニウム母相よりも重い元素が分散していることを示しています。元素分析装置(エネルギー分散型分光分析装置:EDS)を装着した透過型電子顕微鏡(TEM)を用いてさらに拡大して観察すると、この領域のアルミニウム母相の結晶粒は大きさが100nm未済にまで微細化(ナノ結晶化)した伸長した形態を示しており(図1 7)、また、母相中に分散した微細な白色の粒子が投射された炭素鋼であることがわかりました(図1 8)。ここで注目すべきことは、直径数十 μmの粒子を投射しているにも拘らず、散している炭素鋼粒子の大きさは数十 nm~数 μm程度と極めて微細なことです。このような複合組織を私たちはナノ複合組織と呼んでいます。このナノ複合組織は投射粒子が衝突の際に基材と凝着を起こして剥離<sup>23)</sup>、離脱し基材内部に取り込まれ、マクロフォーミング効果によってアルミニウム母相のナノ結晶化を伴いつつ複合組織化したものと

考えています。WPC 処理によって形成されるこのような極めて微細な複合組織をナノ複合組織と呼んでいます。ナノ複合組織の硬さはHV250を上回る値を示し、母相の硬さがHV150程度であることと比較すると著しい高強度化を達成していることがわかります。

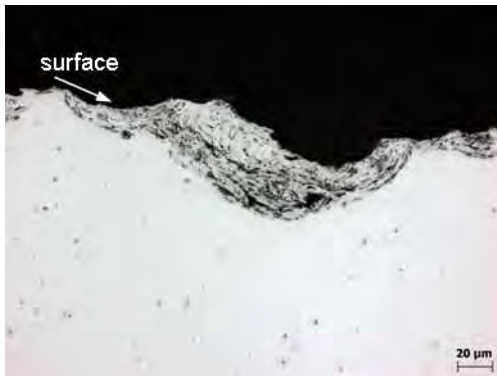


図15 表面近傍の光学顕微鏡写真

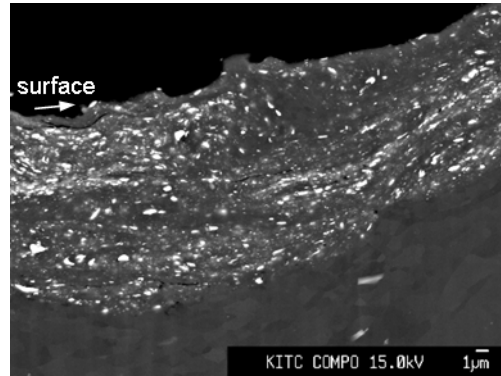


図16 表面近傍のSEMによる組成像

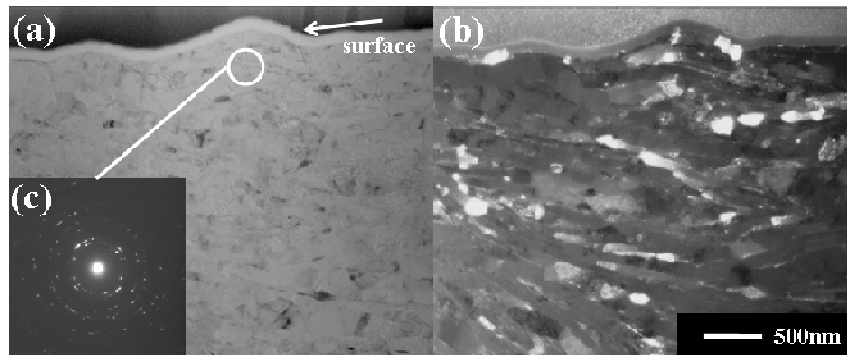


図17 表面近傍の透過型電子顕微鏡像

a) 明視野像、b) 暗視野像、c) 制限視野回折図形(視野直径0.3 μm)

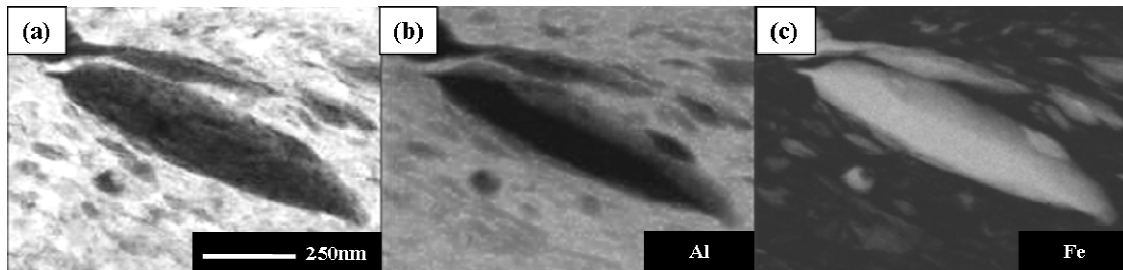


図18 エネルギー分散型分光分析による分散粒子中の元素分布

a) 明視野像、b) Alマッピング、c) Feマッピング

#### 引用文献

- 1) 高木眞一：熱処理, **47**,No.3(2007)107-113.
- 2) N.Kamikawa,N.Tsuji,X.HuangandN.Hansen:Acta.Mater., **54**(2006)3055-3066.
- 3) N.Kamikawa,X.Huang,N.TsujiandN.Hansen:Acta.Mater., **57**(2009)4198-4208.
- 4) M.Umemoto;Mater.Trans., **44**,No.10(2003),1900-1911
- 5) M.Cabibbo,E.EvangelistaandC.Scalabroni:Micron, **36**(2005)401-414.
- 6) Y. W. Tham, M. W. Fu, H. H. Hng, M. S. Yong and K. B. Lim: J. Mater. Processing Tech., **192-193** (2007)575-581.
- 7) G.H.Zahid,Y.HuangandP.B.Prangnell:Acta.Mater., **57**(2009)3509-3521.
- 8) D.Orlov,P.P.Bhattacharjee,Y.Todaka,M.UmemotoandN.Tsuji:Scripta.Mater., **60**(2009)893-896.

- 9) A. Azushima, R. Kopp, A. Korhonen, D. Y. Yang, F. Micari, G.D. Lahoti, P. Groche, J. Yanagimoto, N. Tsuji, A. Rosochowski and A. Yanagida: CIRP Annals Manufacturing Technology, **57**(2008)716-735.
- 10) S Takaki, K Kawasaki and Y Kimura; J Mater. Proc. Tech., **117**(2001),359-363.
- 11) M. Umemoto, K. Todaka, K. Tsuchiya; Mater. Sci. and Eng., A375-377(2004)899-904.
- 12) J. G. Li, M. Umemoto, Y. Todaka, K. Tsuchiya; Acta Mater., **55**(2007)1397-1406.
- 13) Y. Todaka, M. Umemoto, Y. Watanabe, A. Yamazaki, C. Wang, K. Tsuchiya: ISIJ inter., **47** (2007) 157-162.
- 14) G. Liu, J. Lu and K. Lu: Mater. Sci. Eng. **A286**(2000)91-95.
- 15) 高木眞一, 熊谷正夫, 伊藤裕子, 小沼誠司, 下平英二: 鉄と鋼, **92** (2006)318-326.
- 16) N.R. Tao, M.L. Sui, J. Ku and K. Ku: Nano Structured Mater., **11** (1999)433-440.
- 17) I. Altenberger, B. Scholtes, U. Martin and H. Oettel: Mater. Sci. Eng., **A264** (1999)1-16.
- 18) N.R. Tao, Z.B. Wang, W.P. Tong, M.L. Sui, J. Lu and K. Lu: Acta. Mater., **50**(2002)4603-4616.
- 19) X.Y. Wang and D. Y. Li: Wear, **255** (2003)836-845.
- 20) J.L. Liu, M. Umemoto, Y. Todaka, K. Tsuchiya; Mater. Trans., 44, No.7(2003),1488-1493
- 21) M. Umemoto, K. Todaka and K. Tsuchiya: Mater. Sci. Eng., **A375-377** (2004)899-904.
- 22) M. Sato, N. Tsuji, Y. Minamino and Y. Koizumi: Sci. Tech. Adv. Mater., **5**(2004)145-152.
- 23) Y. Kameyama and J. Komotori: J. Mater. Processing Tech., **209**(2009)6146-6155.