

表層ナノ組織制御に基づく金属の革新的高機能化

豊橋技術科学大学 大学院工学研究科 機械工学系

戸高 義一

1. テーマ設定の背景

金属を構成する結晶粒・組織を微細化することにより、金属の種類によらず力学的高機能化できることが古くから知られている。昨今の元素戦略の観点から、特殊な元素の添加を必要としない、金属本来のポテンシャルを最大限に発現できる方法として注目されている。しかしながら、これまでの加工・熱処理による微細化の程度は、マイクロメートル (μm , 10^{-6} m) サイズに留まっていた〔既存技術〕。その微細化の壁を打ち破り、サブマイクロ・ナノメートル (nm , 10^{-9} m) サイズにまで微細化することができれば〔目標〕、金属のさらなる高機能化につながることを期待されていた〔ニーズ〕。

2. 素形材分野との関連性

塑性変形（加工）による表層ナノ組織制御は、金属の種類によらない表面改質技術であり、それに基づいた力学的高機能化（*ex.* 高硬度化、高疲労特性化）の他、吸着性、反応性向上などによる種々の高機能化（*ex.* 高耐食性、低摩擦化）に成功した。

学術的にはこれまでの組織制御からの大きな進展であるが、産業的には新規な加工プロセスのみならず既存の表面改質技術（*ex.* ショットピーニング、切削加工）を工夫・改良することでも飛躍的な特性向上を見込める。このことから、革新的モノづくり（産業応用）へのシームレスな展開が期待できる。

3. 研究開発の成果

研究開発の成果①：表層ナノ組織制御の確立

金属を構成する結晶粒・組織をサブマイクロ・ナノメートル (nm , 10^{-9} m) サイズにまで微細化

できる「表層ナノ組織制御」を確立した。組織微細化のメカニズムを材料因子・加工因子の観点から見直すことで、新規なプロセス（表層ナノ組織化摩擦加工 (SNW, Surface Nanostructured Wearing)¹⁾）を開発すると共に、既存の表面改質技術（*ex.* ショットピーニング²⁾、切削加工³⁾）を工夫・改良することでも「表層ナノ組織制御」が可能であることを示した。

研究開発の成果②：金属の革新的高機能化

成果①に基づいて高品位な表層ナノ組織材料の作製が可能となり、種々の優れた特性を明らかにした。例えば、高疲労特性化³⁾や摩擦係数制御⁴⁾（低摩擦係数化^{1),5)}、高摩擦係数化⁶⁾）などが挙げられる。また、高品位な表層ナノ組織材料を活用することで、筆者を研究代表者として、JST 研究成果展開事業 産学共創基礎基盤研究プログラム、技術テーマ：革新的構造用金属材料創製を目指したヘテロ構造制御に基づく新指導原理の構築、研究課題：「鋼材／潤滑油」界面における機能性ヘテロナノ構造制御に基づく転動疲労高特性化のための指導原理の確立に採択された。特筆すべき研究成果は、金属の組織制御（表層ナノ組織制御）によって潤滑油膜性状を制御できることを示すと同時に、それをトライボロジー特性（低摩擦係数化、高摩擦係数化）の向上へ展開した点である。さらに、それに基づいて転動疲労の高特性化も可能であることを示した。

4. 訴求点

独創性：金属（鉄鋼材料）表層のナノ組織化は、切削や研削などの分野において古くから観察されていた。そのナノ組織は、光学顕微鏡観察において白く観察されることから白層と呼ばれることがある。白層は、不均一に形成すると破壊の起点に

なることから、問題視されていた。筆者は、制御して表層にナノ組織を形成することができれば、組織微細化に基づく力学的高機能化が図れると考えた。また、ナノ組織は、結晶粒界などの格子欠陥（結晶性の乱れた領域）を高密度に含むことから、吸着性や反応性に優れるため、それらに關係する種々の高機能化も図れると考えた。

学術分野での先進性・優位性：既存技術による組織微細化の程度はマイクロメートル(μm , 10^6 m)サイズに留まっていた。筆者は、組織微細化のメカニズムを材料因子（融点、剛性率、加工硬化能等）・加工因子（歪量、歪勾配、歪速度、歪経路等）の観点から見直し、サブマイクロ・ナノメートル(nm , 10^9 m)サイズにまで微細化した組織を塑性変形（加工）により表層に制御して形成することに成功した。

参考文献2)は、表面改質技術の一つであるショットピーニングを対象として、組織微細化に及ぼす歪量、歪勾配の影響を調査し、表層ナノ組織制御の確立に取り組んだ研究である。金属表層で生じる複雑な現象を理解するため、金属表層のみではなく試料全体を微細組織化できる巨大ひずみ加工法を用いて、系統的に研究した点が特徴である。これにより、高品位な表層ナノ組織材料の作製を可能とした。

高品位な表層ナノ組織材料を活用し、種々の高機能化（高疲労特性化、摩擦係数制御等）に成功した。特に、ナノ組織の優れた吸着性や反応性に着目し、潤滑油・添加剤分子とナノ組織との相互作用により低摩擦係数化、高摩擦係数化に成功した点は、これまでのトライボロジー分野の研究・開発にない材料組織的視点を加えた新たな進展となる、学術的先進性・優位性の高い成果である。

社会への貢献度・実用性、波及効果：塑性変形（加工）による表層ナノ組織制御に基づく表面改質は、金属の種類によらず、また、特殊な元素の添加を必要とせず、金属を高機能化できる特長を持つ。既存技術（*ex.* ショットピーニング、切削加工）を工夫・改良することでも表層ナノ組織制御できることから、モノづくり（産業応用）へ

のシームレスな展開が期待できる。加えて、表層ナノ組織化および高機能化に適した合金設計や新規プロセス開発を行なうことで、革新的モノづくり（産業応用）への展開が期待できる。

参考文献

- 1) K. Okada, K. Obayashi, Y. Todaka, N. Adachi, M. Mitsuhara, *Tetsu-To-Hagane / Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*, 106 (2020) 194-204.
- 2) Y. Todaka, M. Umemoto, Y. Watanabe, A. Yamazaki, C. Wang, K. Tsuchiya, *ISIJ International*, 47 (2007) 157-162.
- 3) Y. Todaka, Y. Kawabata, J. Li, S. Tanaka, K. Oguri, T. Suzuki, M. Umemoto, K. Tsuchiya, *Tetsu-To-Hagane / Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*, 96 (2010) 21-28.
- 4) Y. Todaka, N. Adachi, *Journal of the Surface Finishing Society of Japan*, 71 (2020) 756-762.
- 5) Y. Todaka, K. Toda, M. Horii, M. Umemoto, *Tetsu-To-Hagane / Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*, 101 (2015) 530-535.
- 6) K. Tonotsuka, Y. Todaka, N. Adachi, M. Horii, K. Toda, M. Mitsuhara, M. Iwasaki, Y. Shiihara, Y. Umeno, M. Nishida, H. Nakashima, *Tetsu-To-Hagane / Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*, 105 (2019) 160-167.