

材料強度の原子論と格子欠陥制御工学

Atomistics of material strength and lattice defect control engineering

教授 丸山 公一
Professor
Koichi Maruyama



Weight saving and mechanical property development of materials are very important issues for the reduction of environmental burdens and the construction of infrastructure for the sustainable society. Maruyama group is challenging to create new structural materials with the viewpoint of atomistic approaches of material strength and deformation and lattice defect engineering in crystals.

超高温材料の探索

— エネルギー効率の劇的な改善を求めて —

熱機関の基本原理解から、燃焼ガスの温度を高くすればするほどエネルギー効率が改善されることはよく知られているが、実際のエネルギー効率は理想的なものに比べてかなり低い。これは、熱機関内で理想的な断熱仕事が行われていないためであり、その主たる原因は高温で高強度な材料が提供できていないことにある。実用材料の中では最も高温特性に優れたNi基超合金ですら、耐用限界を超えた環境下で使用される状況となっている。そこで当研究室では、高融点金属であるモリブデンの高融点、高強度、低密度そして資源の豊富さに着目し、Ni基超合金の高温特性を大きく越えた、Mo-Si-B三元合金を基本とする新規な超高温材料の探索を進めている。その結果、図1に示すように、Mo-Si-B三元系だけでなく、Mo-Si-Ti-B-C五元系においても共晶反応によって極めて微細な凝固組織を形成することを見出した。さらにこれを1800 °C、24時間熱処理することによって相分解と相安定化による劇的な組織変化が起こり、図2に示すようにMo、Mo₃Si、Mo₅SiB₂、TiCの四相平衡材料となることを見出した。本研究は、科学研究費補助金（基盤研究B）の支援で遂行されている。また、環境科学研究科融合研究プロジェクト（平成22～23年度）にも認定された。研究代表者である吉見准教授は、平成22年3月に日本金属学会功績賞を受賞したほか、平成22年12月に米国ボストンで開催されたMaterials Research Society Fall MeetingのSymposium N — Intermetallics-Based Alloys for Structural and Functional Applicationsの日本代表オーガナイザーも務めた。

多軸鍛造加工における軽金属材料の組織微細化過程

多軸鍛造(Multiple Directional Forging, MDF)は巨大ひずみ加工法の一つである。本研究室では純度の異なる金属アルミニウムに対して室温下でMDF加工を行い、加工中の組織微細化過程や機械的性質に及ぼす加工条件の調査を行っている。加工中の流動応力条件は一回の加工量に相当するひずみ増分 $\Delta \epsilon$ に大きく依存する。MDF法では加工中の流動応力の

最大値が比較的低い累積ひずみ（約2程度）で飽和する傾向が認められるが（図3）、ひずみ増分を増加させると、流動応力の飽和現象は認められなくなり、累積ひずみが5に増加しても最大流動応力は増加し続けている。一方で、純アルミニウムのMDF加工曲線では、各圧縮応力-ひずみ曲線において高い頻度で加工中の流動応力の一時的な低下が認められる。ひずみ増分量が小さい場合、ハウシinger効果による流動応力の低下とその後の加工硬化がバランスし、流動応力の飽和現象が認められるものと考えられる。一方でひずみ増分量が大きい場合は十分な加工硬化が生じるために、最大流動応力が増加する。また、組織発達過程もひずみ増分量に大きく依存する。ひずみ増分が増加すると加工初期から初期粒内に15度以上の角度差を持つ大角粒界が数多く形成され（図4）、これらが流動応力の増加に寄与しているものと考えられる。一方でひずみ増分量が小さい場合、初期結晶粒内の複数の方向に発達したミクロせん断帯や変形帯の交点から新しい高角粒界が形成する。以上の成果は国内・国際会議にて発表されている。

高温材料の長時間強度評価

高効率な超々臨界圧蒸気火力発電は、中国、インド、ベトナムなど途上国での電力安定供給とCO₂排出削減を両立させるのに不可欠な技術で、それを支えるのが先進高Cr耐熱鋼である。この種の用途では、600 °Cで20万時間後にクリープ破断する応力を正しく推定できることが求められる。原子力発電はCO₂を出さない点で優れているが、今の軽水炉は低効率で、核廃棄物も多く、100年で核燃料を使い果たしてしまう。この問題を解決できる第4世代原子炉（例えば高速増殖炉）では、550 °C、120 MPaで50万時間使ってもクリープ破断しない先進高Cr耐熱鋼が求められている（図5の×印）。したがって、550 °C、50万時間でクリープ破断する応力を正しく評価する必要がある。しかし、そのような条件での材料特性を直接評価するのは困難なため、短時間試験結果を外挿して長時間特性を評価してきた。図の点線は、従来からの手法で評価した結果である。これに対して当分野では、損傷機構が同じ領域毎にデータを区分して長時間挙動を評価する領域区分法を提案している。その



准教授
吉見 享祐
Associate Professor
Kyosuke Yoshimi



助教
鈴木 真由美
Assistant Professor
Mayumi Suzuki

評価結果が、図中の太い実線で、白抜記号が長時間挙動評価に使ったデータ、塗りつぶし記号は後に得た実測値である。従来法で評価すると、長時間のクリープ破断時間を10倍も過大評価することになる。これに対して領域区分の概念を導入すると、予測と実測の差が1.2倍以下になる。そして、この概念を使う

ことで、現在実施中のNEDOプロジェクトの「クリープ破断時間の推定誤差1.2倍以内」という高い目標をクリアできた。また関連研究の発表で、当分野の学生が、日本鉄鋼協会H22年秋季大会優秀ポスター発表賞を受賞した。

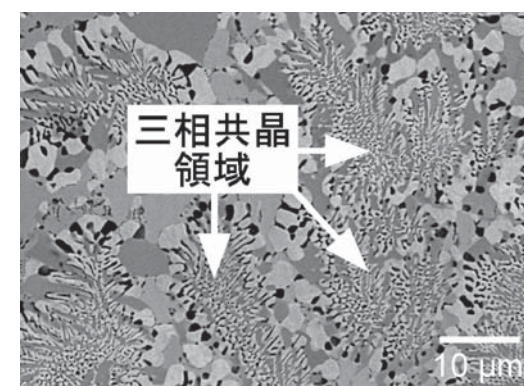


Fig.1 As-cast microstructure of a Mo-Si-Ti-B-C alloy.

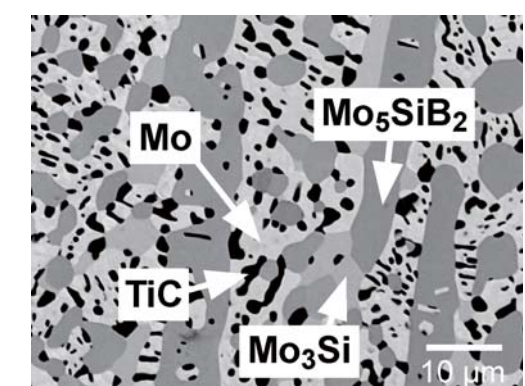


Fig.2 Microstructure of a Mo-Si-Ti-B-C alloys after heat treatment at 1800°C for 24 h.

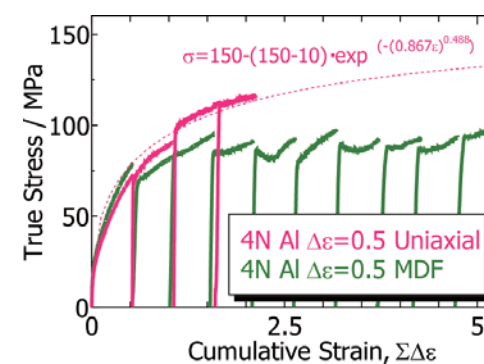


Fig.3 Cumulative strain – stress curves in high purity (4N) aluminum during multi-directional forging and uniaxial compressions.

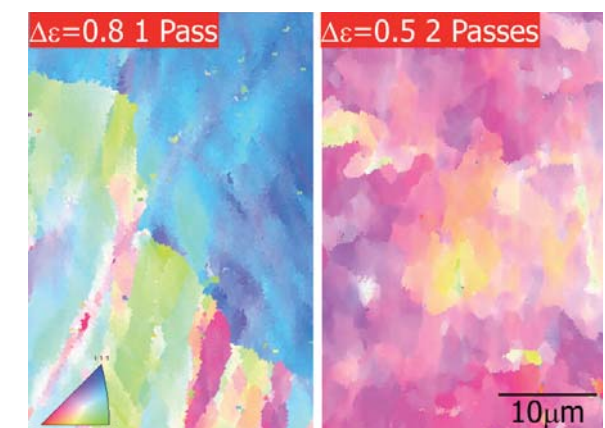


Fig.4 Crystal orientation maps in pure (2N) aluminum after MDF. (a) 1 pass with $\Delta \epsilon = 0.8$, (b) 2 passes with $\Delta \epsilon = 0.5$.

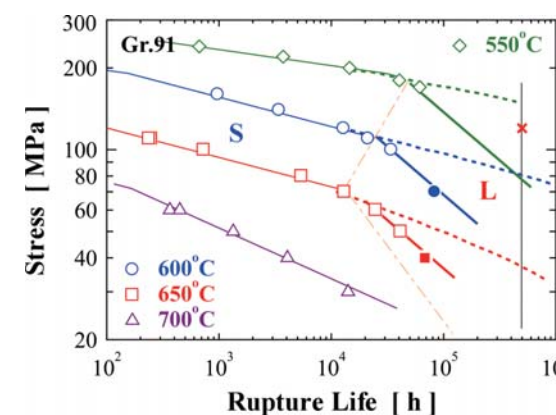


Fig.5 Evaluation of long-term creep rupture life of grade 91 steel by the conventional method (dotted line) and by the multi-region analysis proposed (thick solid line).

特筆すべき業績

- 1) The Japan Institute of Metals Meritorious Award, K. Yoshimi, on 28/03/2010.
- 2) Outstanding poster award of the Iron and Steel Institute of Japan, M. Takahara, H. Ghassemi Armaki and K. Maruyama, "Role of M₂₃C₆ particles in recovery of lath microstructure during high temperature aging of high Cr ferritic steels", on 26/09/2010.