

シンポジウム(口頭講演) | シンポジウム：不規則・不均質材料の力学における材料横断的融合とその最前線

■ 2025年9月10日(水) 13:30 ~ 16:45 | 会場 N103 (共通講義棟北)

[10p-N103-1~6] 不規則・不均質材料の力学における材料横断的融合とその最前線

篠崎 健二(産総研)

13:30 ~ 14:00

[10p-N103-1] 高圧ねじり加工により構造若返りした金属ガラスの力学特性と組織

○足立 望¹、鈴木 隆之¹、榎園 知弥¹、石井 裕樹¹、安部 洋平¹、戸高 義一¹ (1.豊橋技科大工)

14:00 ~ 14:30

[10p-N103-2] ゴムの亀裂進展における速度ジャンプと亀裂先端の尖りのメカニズム

○作道 直幸^{1,2} (1.ZEN大、2.東京大工)

14:30 ~ 15:00

[10p-N103-3] 強靱なダブルネットワークゲルの破壊機構

○中島 祐¹ (1.北大院先端生命)

15:15 ~ 15:45

[10p-N103-4] ガラス状インターロック超分子樹脂の構造と物性

○加藤 和明¹ (1.京工繊大)

15:45 ~ 16:15

[10p-N103-5] 結晶粒径の不均質制御による多機能金属材料の創製

○菊池 将一¹ (1.静大工)

16:15 ~ 16:45

[10p-N103-6] 金属材料の高温クリープ損傷を対象としたマルチスケールモデリング

○柴沼 一樹¹ (1.東大工)

高圧ねじり加工により構造若返りした金属ガラスの力学特性と組織

Mechanical property and microstructure of rejuvenated metallic glass using high pressure torsion process

豊橋技科大工¹ ○足立 望¹, (M2)鈴木 隆之¹, (M2)榎園 知弥¹, 石井 裕樹¹, 安部 洋平¹,
戸高 義一¹

Toyohashi Univ. of Tech.¹, °Nozomu Adachi¹, Takayuki Suzuki¹, Tomoya Enokizono¹, Yuki Ishii¹,
Yohei Abe¹, Yoshikazu Todaka¹,

E-mail: n-adachi@me.tut.ac.jp

【緒言】

構造不規則系材料の一つである金属ガラス(BMG)は、転位運動によるすべり変形機構が働かないことにより、せん断の形成に伴い脆性的に破壊する。我々は、巨大ひずみ加工法の一つである高圧下ねじり(HPT)加工を用いて予ひずみを導入することで、引張応力下においても塑性変形を示すことを報告している。この延性発現には、加工によって生じる構造若返り等によるアモルファス組織の変化に起因していると考えられる。一般に、金属ガラス中に存在する自由体積(FV)は、Shear transformation zone (STZ)の形成に寄与すると考えられており、塑性変形の発現に重要な因子であるとの報告が多数ある。しかしながら、密度測定により評価した HPT 加工材の FV 量は、延性を示さない鑄造材のそれと比較して同等であり、FV では延性発現を説明することは難しい。本発表では、HPT 加工によって生じる金属ガラスの力学特性について報告するとともに、構造緩和挙動を通して調査した組織について紹介する。

【実験方法・結果】

傾角鑄造法により作製した $Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}(\text{at}\%)$ を供試材とし、HPT 加工により、予ひずみを付与することで構造若返りを生じさせた。各試料における構造緩和挙動の評価には、示差走査熱量測定(DSC)およびアルキメデス法による密度測定を用いた。力学特性の評価には、引張試験（初期ひずみ速度: $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ）を主に用いた。HPT 加工材において認められた密度低下および緩和エンタルピーから、HPT 加工材は、鑄造材と比較して多量の FV および anti-FV を有することが明らかとなった。さらに、HPT 材の緩和エンタルピーは、熱処理による構造緩和の進行に伴って単調に増加する一方で、密度は不連続に変化する特異な挙動を示すことが明らかになった。

【謝辞】

本研究は、JSPS 科研費 学術変革領域研究 B（22H05039, 22H05042）の助成を受けて実施された。

ゴムの亀裂進展における速度ジャンプと亀裂先端の尖りのメカニズム Mechanism of Velocity Jump and Crack Tip Sharpening in Crack Propagation of Rubbers

ZEN 大学知能情報社会学部¹, 東京大学工学系研究科² °作道 直幸^{1,2}

ZEN Univ.¹, Univ. of Tokyo², °Naoyuki Sakumichi^{1,2}

E-mail: sakumichi@gel.t.u-tokyo.ac.jp

ゴムやゲルなどの柔らかい粘弾性高分子材料は、産業、医療機器、食品分野で広く使用されており、これらの破壊特性の理解には、科学的関心と実用的重要性がある。これらの材料における亀裂進展では、亀裂進展速度が低速から高速へと急激に加速する「速度ジャンプ」現象が生じ、一気に破壊が進行する [1-4]。このとき、亀裂先端の形状に注目すると、低速では亀裂先端が丸い放物線状を示すが、高速では亀裂先端が鋭化することが知られている [2]。また、ゲルでは、亀裂進展速度の上昇とともに先端形状が放物線から大きく逸脱することが観察されている [5]。線形弾性破壊力学によれば静的な亀裂形状は放物線状となることが知られており、低速の破壊の結果と一致する。しかし、高速で亀裂先端の鋭化が生じるメカニズムは明らかにされていない。

本研究 [6] では、亀裂進展速度に応じた粘弾性体の亀裂形状の変化について、理論的な解析を行った。具体的には、ゲルやゴムを単純化した線形粘弾性の標準線形固体モデル（三要素 Zener モデル）で粘弾性を与えたシート材料における定常的な亀裂進展において、亀裂形状を数学的に導出した。図 1 より、従来、非線形弾性に起因するとされていた [5] 亀裂先端の鋭化は、線形粘弾性のみで生じうることを示すことに成功した。また、得られた亀裂形状の解析解から、亀裂形状が、異なるべき指数で特徴づけられる 3 つの領域に分かれることを示した。この結果は de Gennes がエネルギーバランスとスケーリングから提唱した「粘弾性トランペット」[7] と一致した。

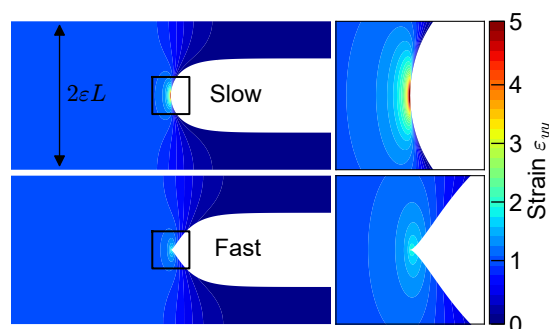


図 1 一定速度での定常的な亀裂伝播中のひずみ場と亀裂形状。(上) 低速破壊では、亀裂先端の形状はおおよそ放物線形である。(下) 高速破壊では、プロファイルは放物線形から大きく逸脱する。速度が増加するにつれて形状は徐々に鋭くなる。

- [1] A. Kadir and A. G. Thomas, Rubber Chem. Technol. **54**, 15 (1981).
- [2] Y. Morishita, K. Tsunoda, and K. Urayama, Phys. Rev. E **93**, 043001 (2016).
- [3] N. Sakumichi and K. Okumura, Sci. Rep. **7**, 8065 (2017).
- [4] A. Kubo, N. Sakumichi, Y. Morishita, *et al.*, Phys. Rev. Materials **5**, 073608 (2021).
- [5] A. Livne, E. Bouchbinder, and J. Fineberg, Phys. Rev. Lett. **101**, 264301 (2008).
- [6] H. Nagatakiya, N. Sakumichi, S. Kobayashi, and R. Tarumi, *under revision*. arXiv:2312.07916
- [7] P. G. de Gennes, Soft adhesives, Langmuir **12**, 4497 (1996); “Soft Interfaces: The 1994 Dirac Memorial Lecture” (Cambridge Univ. Press, 1997).

強靱なダブルネットワークゲルの破壊機構

Fracture Behavior of Tough Double-Network Gels

北大院先端生命・北大 WPI-ICReDD¹ ○中島 祐¹

Hokkaido Univ.¹, ○Tasuku Nakajima¹

E-mail: tasuku@sci.hokudai.ac.jp

ダブルネットワーク (DN) ゲルは、2 種の高分子網目の相互侵入により得られる強靱ゲルである¹⁾。DN ゲルは約 90wt% という高い含溶媒率 (すなわち、含ポリマー率はたった 10wt%) を持ちつつも、トラックで踏んでも壊れないほどの丈夫さを示し、DN ゲルの開発は「ゲルは壊れやすい」という概念を過去のものとした。強靱な DN ゲルを構成する 2 種の網目は、どんなものでも良いのではなく、以下の 2 条件を満たす必要がある。

A. 第 1 網目は極めて脆く (最大延伸度が小さく)、第 2 網目は極めて高伸長性である。

B. 第 1 網目は、第 2 網目に対して十分に弱い (破断強度が小さい)。

上記 2 条件が満たされれば、DN ゲルは多様な高分子種・溶媒種から (化学種によらず) 合成可能である^{2,3)}。また溶媒を含まない DN エラストマーも作成可能である。DN ゲルの優れた力学特性およびその発現原理の解明は、柔軟高分子材料の強靱化の観点から学問的・産業的に重要であり、多くの研究者の興味を引き付けてきた。DN ゲルが開発されてから四半世紀が経過した今でも分かっていないことが多く、その研究は尽きない。

DN ゲルの強靱化メカニズムは、大まかには犠牲結合原理で説明される。脆と柔の DN ゲルにき裂を進展させるためには、最終的には高伸長性の第 2 網目にき裂を進展させる必要がある。第 2 網目にき裂を進めるには、ゲルを極めて大きく変形させなければならない。この大変形過程で、き裂周辺 (Figure 中の damage zone) にある脆い第 1 網目が大量に破壊され、大量のエネルギーが熱として散逸することにより破壊に要するエネルギーが大きくなる。き裂進展に要するエネルギーは、第 1 網目単体が 1 J m^{-2} 、第 2 網目単体が 10 J m^{-2} のオーダーであるのに対し、DN ゲルでは 1000 J m^{-2} ものオーダーに達する⁴⁾。

当日は、DN ゲルの強靱化メカニズムを概説するほか、近年の研究によって分かってきたミクロな破壊の様子や、環境効果などについて紹介する。

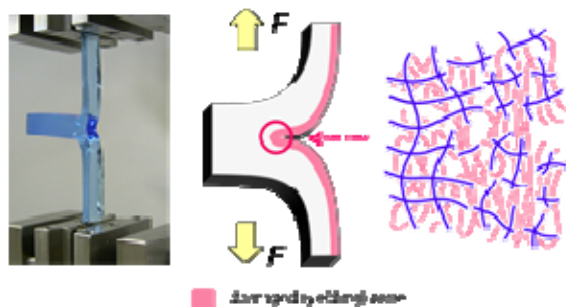


Figure: Damaged zone formation around the crack tip of a double-network gel

【参考文献】

- 1) J. P. Gong *et al.*, *Adv. Mater.* **2003**, *15*, 1155.
- 2) T. Nakajima *et al.*, *Adv. Funct. Mater.* **2012**, *22*, 4426.
- 3) T. Nakajima *et al.*, *ACS Macro Lett.* **2019**, *8*, 1407.
- 4) Y. Tanaka *et al.* *J. Phys. Chem. B* **2005**, *109*, 11559.

ガラス状インターロック超分子樹脂の構造と物性

Structure and Properties of Mechanically Interlocked Supramolecular Glassy Resins

京都工繊大 °加藤 和明

Kyoto Institute of Technology, °Kazuaki Kato

E-mail: kato@kit.ac.jp

ひも状の長い分子（高分子）がからみ合っできる高分子樹脂に対して、環状分子と高分子がネックレス状にインターロックした超分子からも同様に樹脂が得られる（図1）。主成分は質量の80%以上を占める環状分子であり、環状分子が形成する非晶状の材料骨格のすき間に高分子が収納された構造をしている。環状分子と高分子の間に強い相互作用はなく機械的に噛み合っているだけなので、材料骨格と高分子の運動性の間には非常に高い自由度がある。ただし高分子の末端は嵩高くなっていて環を滑り抜けることはできないため、環と高分子は完全に自由ではなく緩やかに拘束され合っており、この緩やかな拘束の効果はガラス転移ダイナミクスに表れることも分かっている。

この特殊な構造をした材料の変形に対する応答は特異的である。室温のガラス状態では既存の高分子樹脂ガラスと同等の1~2 GPa程度のヤング率を示すが、降伏して100%以上の破断伸びを示す材料である。放射光X線散乱を用いて延伸下での構造解析を行うことで、図2に示すように降伏とともに特異な相分離構造を形成することがわかる。変形前の環状分子の配向は等方的であり、隣接する環状分子間の距離にも大きなばらつきがない均質材料であるが、降伏後にネッキングが起こった部分で特異的に環状分子と高分子の相分離が起こり、環状分子の開口面は延伸と垂直な方向に配向する。さらに、このひずみ誘起変態によって環状分子間の距離は短くなり、変態前は環に覆われて結晶化できなかった高分子が結晶化できるようになる。こうして相分離構造は変形前の均質状態よりも変形しにくくなった結果、ひずみは非局在化して隣接部分にネックが伝播して高い延性を示したものと考えられる。変形前の均質構造では環状分子が材料骨格の弾性を担っていたため、そのすき間に存在する高分子は弾性に寄与していなかったが、降伏が起こるとひずみは高分子に移り、高い延性を実現する相分離を引き起こす。このように弾性と延性を担う異なる相を互いに緩やかに拘束させることが、トレードオフの関係にある特性を両立する効果的な戦略の一つになると考えられる。

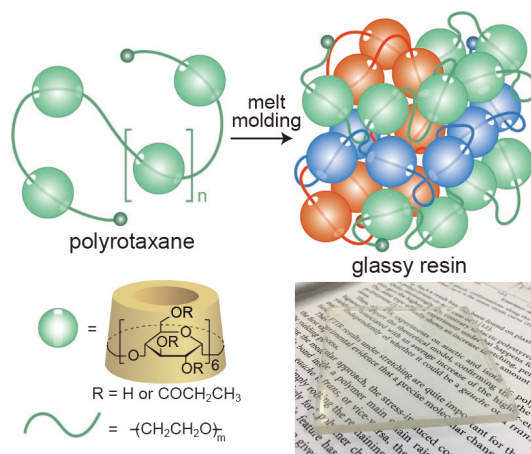


Figure 1. Structure of a mechanically interlocked supramolecule (polyrotaxane) and the glassy material obtained by melt-molding it.

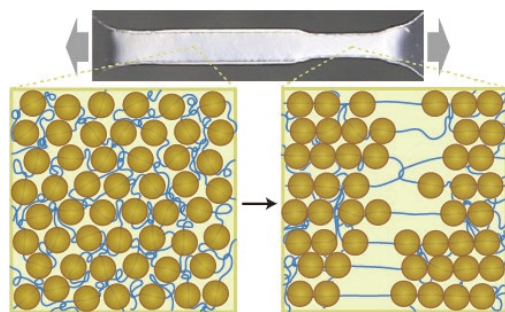


Figure 2 Strain-induced phase separation of cyclic molecules (sphere) and threading polymer (chain) observed in polyrotaxane resins.

結晶粒径の不均質制御による多機能金属材料の創製

Fabrication of Multifunctional Metallic Materials by Controlling Grain Size

Heterogeneity

静大工¹ ○菊池 将一¹

Shizuoka Univ.¹, °Shoichi Kikuchi¹

E-mail: kikuchi.shoichi@shizuoka.ac.jp

金属材料の力学特性はミクロ構造に依存する．とくに多結晶な構造用金属材料の場合，結晶粒を小さくすることにより金属は高強度化するため，これまで「均質・微細な結晶粒を作る」研究が進められてきた．しかし，結晶粒を小さくすると，金属の延性は失われ，力学特性はトレードオフの関係となる．

このような力学的トレードオフを解消するため，立命館大学の研究グループによってネットワーク状の微細結晶粒が粗大結晶粒を取り囲む不均質構造金属が開発された．出発材料を金属粉末とし，強加工プロセスによって表面のみの結晶粒を微細化した粉末を焼結することにより，このような不均質構造を創製することができる (Fig.1)．著者は，主に不均質構造金属の動的な力学特性（疲労特性）について，系統的な検討を加えてきた．これまでに，結晶粒の大きさに起因するミクロ力学特性差が応力・ひずみ分配を引き起こし，それが金属材料の多機能化にとって重要因子であることが明らかになりつつある．本講演では，結晶粒径の不均質制御による金属材料の多機能化発現機構解明に関する実験的・解析的取り組みについて紹介する．

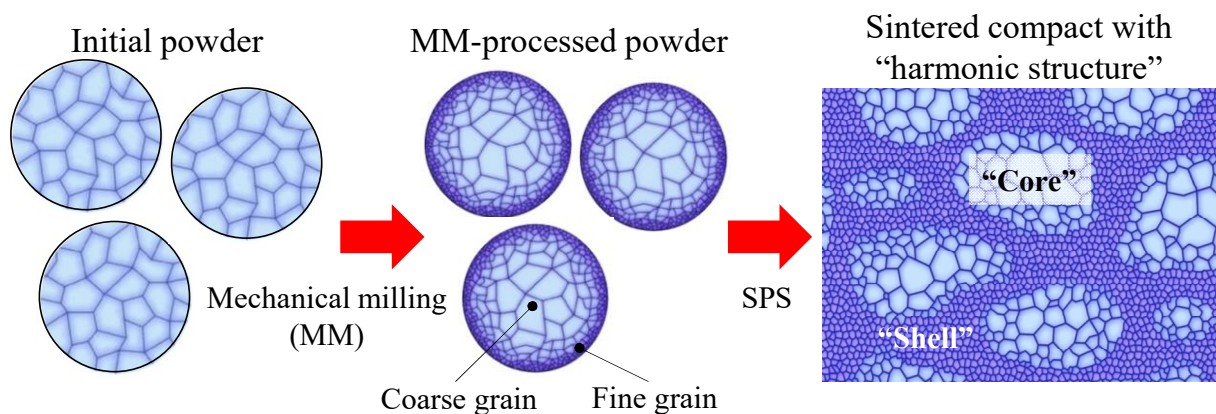


Fig.1 Schematics of metallic materials having heterogeneous grain size distribution fabricating using severe plastic deformation and powder metallurgy processes.

金属材料の高温クリープ損傷を対象としたマルチスケールモデリング

Multiscale modeling of high temperature creep damage in metallic materials

東京大学, °柴沼 一樹

The University of Tokyo, °Kazuki Shibanuma

E-mail: shibanuma@struct.t.u-tokyo.ac.jp

本研究では、金属材料の高温クリープ損傷という支配因子やメカニズムが多岐にわたる複雑な現象を定量的に説明・予測することを目的として、ナノスケールの分子動力学解析とマクロスケールの有限要素解析を接続するためのミクロスケールモデルを構築した。

本モデルは、微視組織モデル、粒成長モデル、ボイド生成・成長モデルの3つのサブモデルを連成した統合化モデルとして構築した。微視組織モデルでは、4段階のデータ構造（結晶粒、粒界ファセット、三重線、四重点）で幾何情報を記述し、3次元多結晶体を自動生成するアルゴリズムを構築した。粒成長モデルでは、粒界移動および粒界拡散の2つのメカニズムを考慮することで、微視的変形や巨視的ひずみ速度を再現した。ボイド生成・成長モデルでは、粒界の相対運動に基づいてボイド生成を定式化し、その成長挙動は粒界およびボイド表面での拡散流束に基づいて評価した。これらのサブモデルを統合することで、高温クリープ損傷の進展挙動を多結晶レベルで再現可能なモデリングの枠組みを確立した。

モデルの妥当性を検証するために、まずその変形挙動について、粒径や応力がひずみ速度に及ぼす影響が理論式と一致することを確認した。ボイドの生成・成長については、純ニッケルを用いた実験との比較により、粒界上での生成位置や成長形状を高精度で再現できることを示した。

さらに、構築したモデルを用いて各種因子の影響を評価した結果、多軸応力状態下では相当応力を用いることで変形挙動を一元的に整理でき、また応力三軸度が高まるとボイド進展が加速する傾向が明らかとなった。加えて、粒径の分散が大きいほど損傷抵抗性が低下することを示した。これにより、本モデルが耐熱金属材料の外力・材料設計に有効なツールであることを示した。

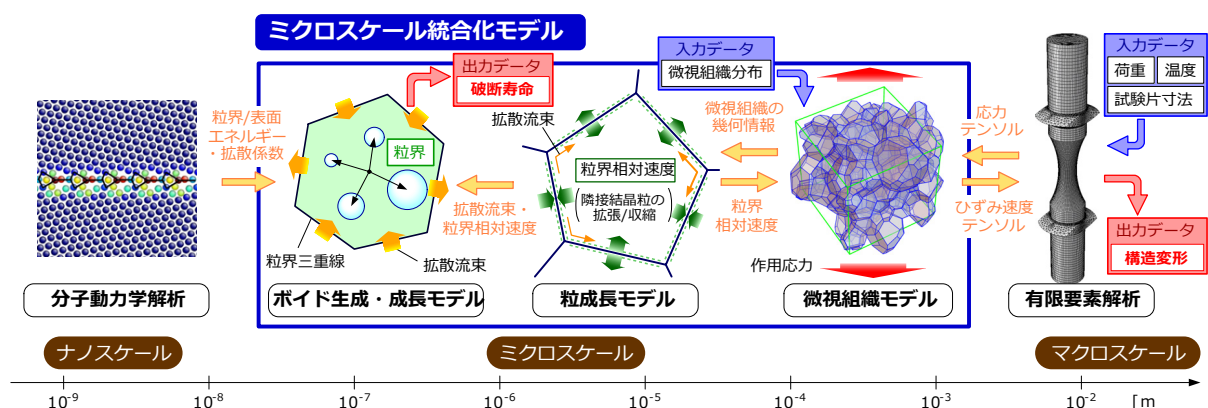


図1 金属材料の高温クリープ損傷を記述するマルチスケールモデリング

参考文献： K. Shibanuma et al., Materials & Design 244 (2024), 113198.
K. Sagara et al., Materials & Design 244 (2024), 113197.