

塑性加工シミュレーションの高度化と中性子計測技術

高村 正人*、竹谷篤*、山田雅子*、見原俊介*、須長秀行*、大竹淑恵*

*独立行政法人理化学研究所 光量子工学研究領域 (RAP)
光量子技術基盤開発グループ 中性子ビーム技術開発チーム

takamura@riken.jp

要旨

金属板材のプレス加工技術においては、しわ、われ、面ひずみ、スプリングバックといった不具合の回避のため、1990年頃から有限要素法 (FEM) を用いた計算機シミュレーションが盛んに行われるようになった。その結果しわやわれの事前予測が可能となり、広く実務適用されている。

しかしその後、自動車車体軽量化の要請が厳しさを増し、高張力鋼板、アルミニウム合金等の適用が急速に増加している。これらの材料においては、スプリングバックが大きく、また特異な応力-ひずみ関係を示す等、従来多く使われていた軟鋼板とは大きく異なる性質があり、その加工そのものとともに不具合予測が極めて難しくなっている。

一方、近年板鍛造技術により複雑形状部品を低コストで生産しようという動きが加速しており、そのカギを握る板材せん断加工の高度化とその現象把握、及び予測技術が求められている[1]。ここでは、大ひずみ域での応力-ひずみ関係やき裂進展現象の詳細な把握とモデル化が必要となる。

他方、これまでのマクロスコピックな構成則に基づく塑性加工シミュレーションに代わり、すべり変形、双晶変形といった結晶レベルの素過程の変形抵抗モデルに基づいて集合組織 (結晶方位の偏り) の発展を予測する「結晶塑性有限要素法」の研究が近年盛んである。例えば浜らは、この手法を用いて、集合組織の予測だけでなく、単軸引張時の応力-ひずみ曲線や除荷時の非線形挙動などのマクロな力学挙動を予測することに成功した[2]。

しかし、結晶塑性有限要素法においては、単結晶レベルでの正確なすべり抵抗や結晶粒界での力学挙動など、これまで十分に解明されていない点が多く、計測技術の発展に期待しつつより高度な解析技術に発展する余地が大きく残されている。また、マグネシウムやチタン等複雑な力学挙動を示す材料に対しても、結晶塑性有限要素法によってマクロな硬化特性を精度よく予測することによって、従来のマクロスコピックな塑性加工シミュレーションの精度、及び実用性を飛躍的に向上させることができる。

そこで、筆者らは理研小型中性子源 (RANS) を用いたブラッグエッジイメージング等を活用して、塑性変形中の金属微視組織の変化を観察し、得られた情報を結晶塑性解析におけるすべり抵抗モデルあるいは結晶粒界モデルに反映させることを計画中である。結晶粒レベルのメゾスコピックな変形挙動からマクロな変形挙動を予測する結晶塑性シミュレーションにおいては、対象とするメゾスケールが中性子測定で得られるスケールと同程度と考えられるため、中性子測定と結晶塑性シミュレーションは非常に親和性の高い技術であると考えられる。具体的には、RANSによるブラッグエッジイメージング[3]により塑性変形中の集合組織、結晶粒径の変化を位置依存で計測する。これにより、塑性変形過程の金属微視組織の情報をきめ細かく取得し、結晶塑性解析を高度化することによって、実用レベルの塑性加工シミュレーションを革新的に高精度化することを目指している。

参考文献

- [1] Takamura, M., Ozaki, T., Miyoshi, Y., Sunaga, H., & Takahashi, S.: Proc. ICTP 2011, (2011), 591.
- [2] Hama, T. & Takuda, H., Int. J. Plasticity, 27 (2011), 1072.
- [3] H. Sato, et al., Mater. Trans. 52 (2011), 1294.

2013年12月6日(金)

理研シンポジウム

稼働を開始した理研小型中性子源システム「RANS」

塑性加工シミュレーションの高度化と 中性子計測技術

独立行政法人 理化学研究所
中性子ビーム技術開発チーム

高村 正人

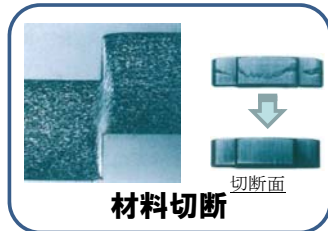


板材せん断過程のシミュレーション

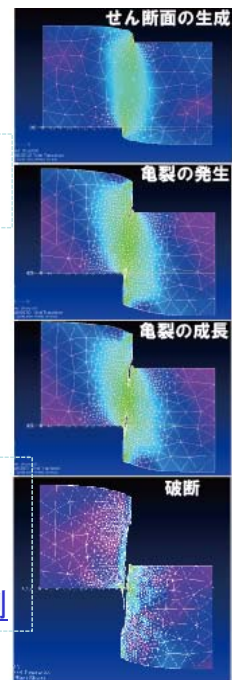
せん断加工そのシミュレーション技術

せん断加工とそのシミュレーション技術の重要性増大

- 低コスト化: 切削、焼結、ダイキャスト等から板鍛造等への工法置換



断面性状の
制御と予測

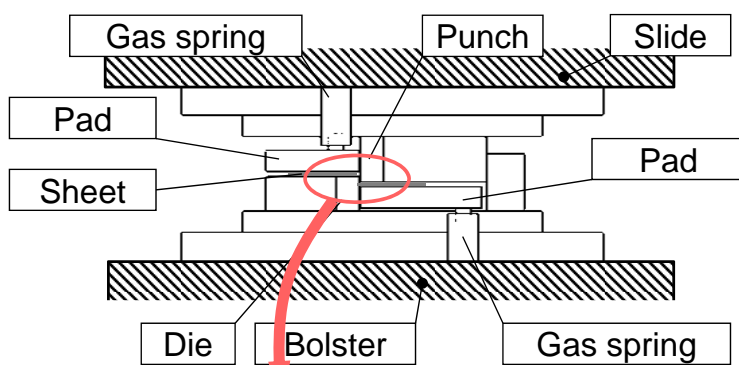


- 軽量化: 高張力鋼板の適用拡大

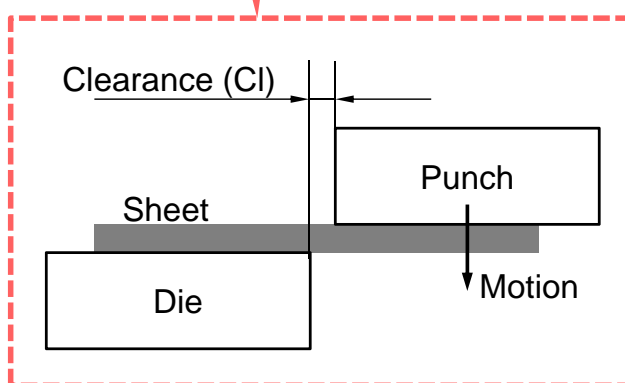


プレス成形時の
ブランク端ワレ
(伸びフランジワレ)の制御と予測

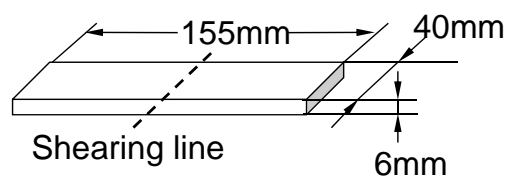
「ちぎれる」過程のシミュレーション ~ 板材のせん断



アミノ製50Tonサーボプレス



- 材質: SCM415
- 板厚6mm, 板幅40mm, 長手方向155mm
- クリアランス: 10%t, 1%t



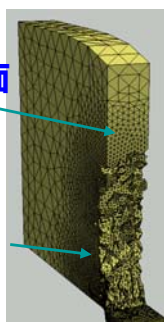
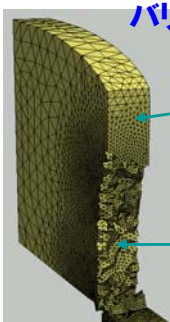
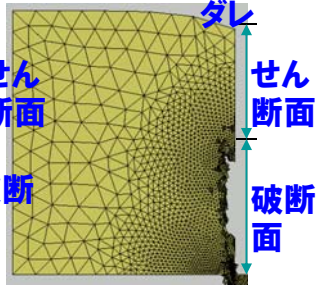
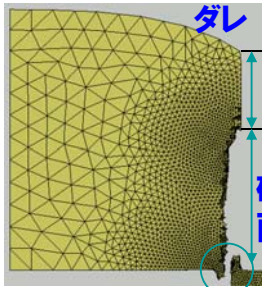
材料寸法

解析結果及び実験結果(せん断完了時の形状)

クリアランスの違いによるせん断面・破断面形状の差異を確認

クリアランス:10%t
(0.6mm)

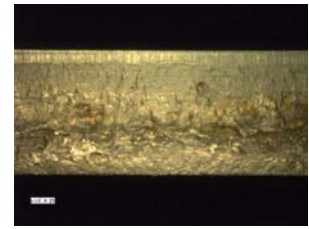
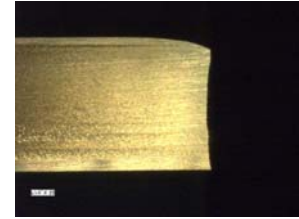
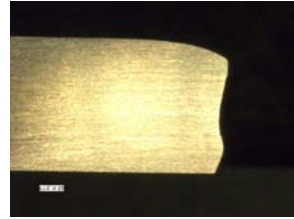
クリアランス:1%t
(0.06mm)



解析結果

クリアランス:10%t
(0.6mm)

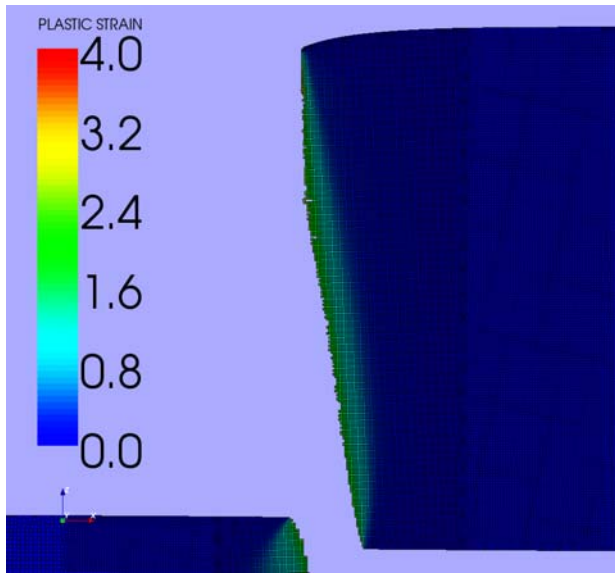
クリアランス:1%t
(0.06mm)



実験結果

より詳細な材料特性の把握へ

金属材料極限変形時に発生するひずみ値



相当塑性ひずみ分布
(板厚3.2mmの鉄鋼材料のせん断解析結果)

100%(1.0)を超える大ひずみが広い範囲で生じている(ひずみ速度も大きい)。



せん断、破断現象は、このような高ひずみ域の変形挙動に支配されている。



高ひずみ域での特性の計測方法、モデル化手法は未確立

より詳細な材料特性の把握へ

■ 塑性変形解析に必要な材料特性

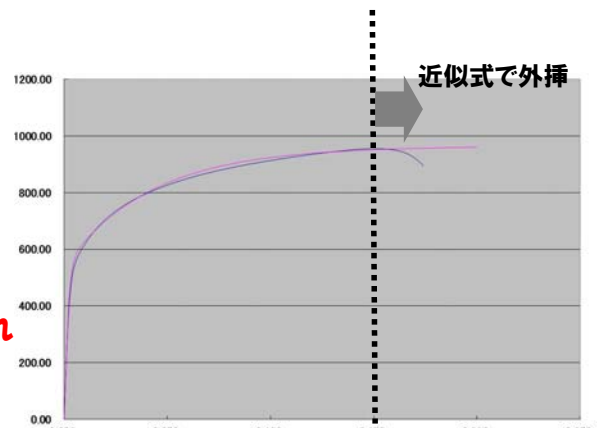
- 応力-ひずみ曲線



単軸引張試験

⇒ くびれが発生しない(=応力が均一)な範囲でのみ応力値を同定できる

得られる応力-ひずみ曲線は高々塑性ひずみ=10~30%まで

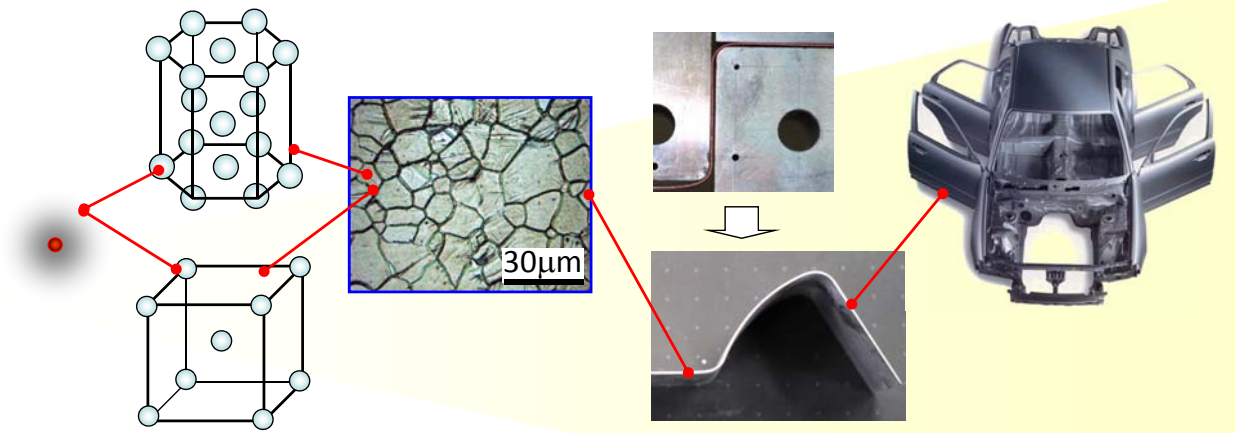


応力ひずみ曲線(京大 浜准教授提供)
(計測可能範囲外は近似式で外挿)

- 大ひずみ域に至るまでの特性
(ex. 塑性ひずみ=100%以上、-50%以下)

→ 従来技術では計測不可能

材料のマイクロ組織とマクロ変形



分子動力学

多結晶塑性論

有限要素法

量子力学

材料科学(転位論)

従来の連続体力学

10^{-12}
(pm)

Å

10^{-9}
(nm)

10^{-6}
(μm)

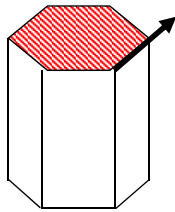
10^{-3}
(mm)

10^0
(m)

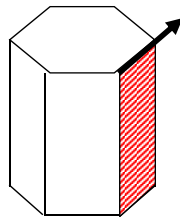
資料提供: 京都大学大学院エネルギー科学研究科 浜准教授

結晶塑性有限要素法の考え方

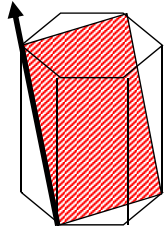
底面すべり



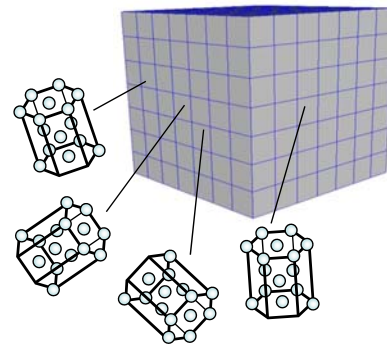
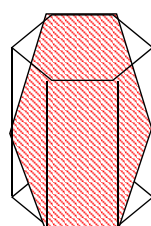
柱面すべり



錘面すべり



引張双晶



○それぞれの“要素”が結晶粒に相当すると仮定

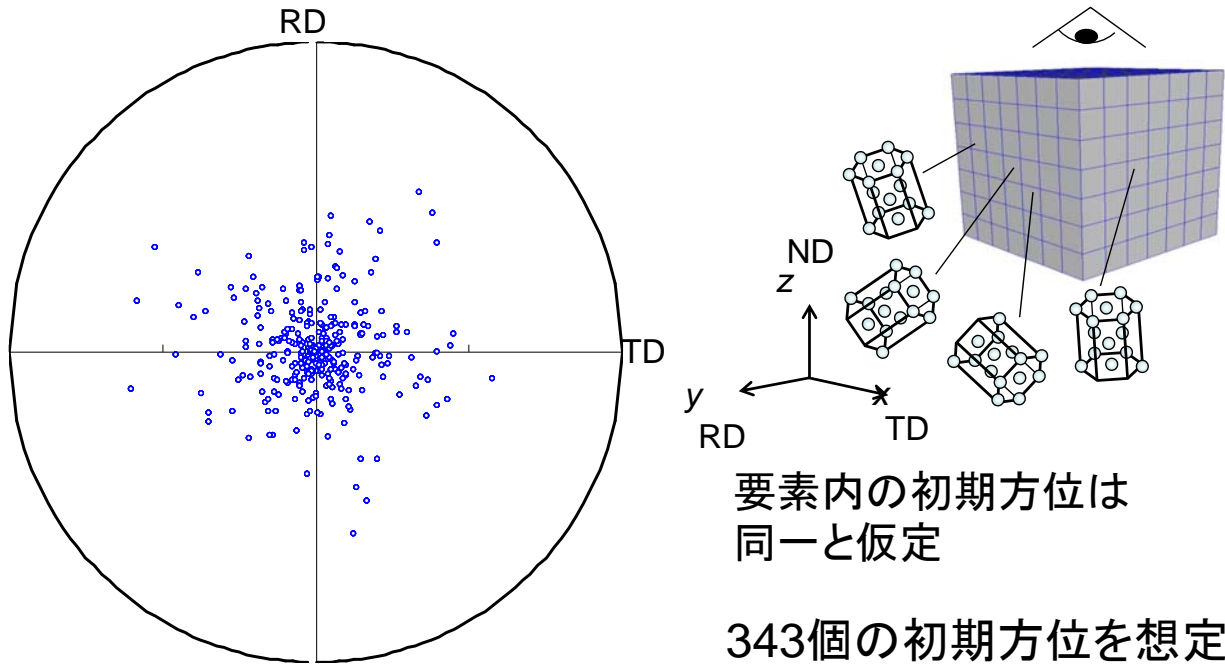
○各要素の変形は、各すべり系、双晶系の活動の重ね合わせによって表されると仮定

★ 結晶方位進展が予測できる

★ 変形に伴う応力-ひずみ関係が予測できる

Hama, T. & Takuda, H., Int. J. Plasticity, 27 (2011), 1072.

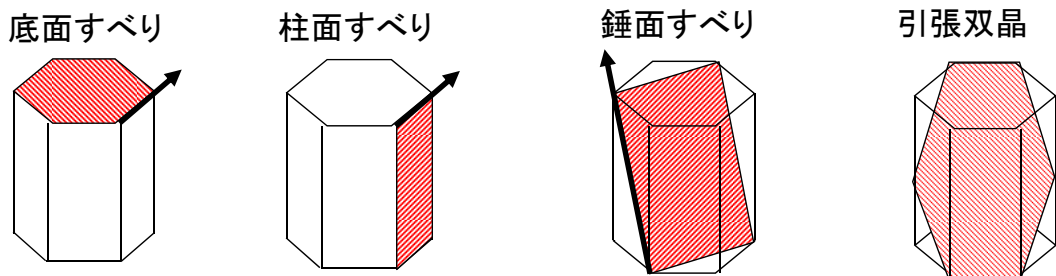
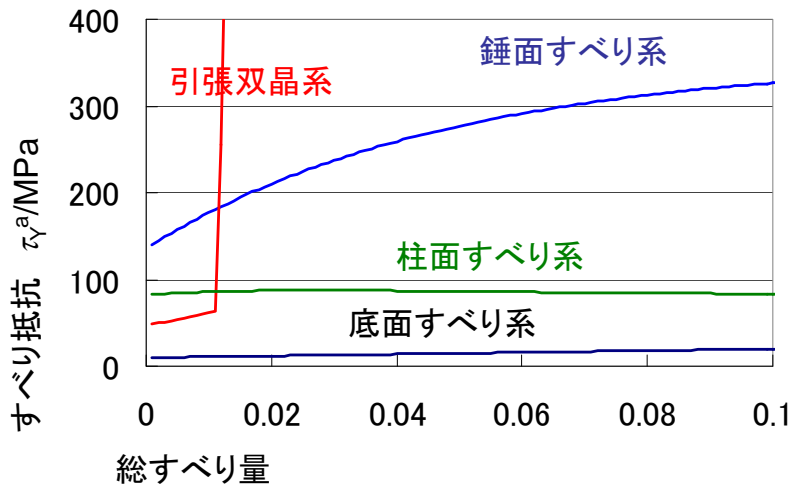
解析で用いた集合組織の(0002)極点図



実際の分布を模擬して人為的に作成⁽²⁾

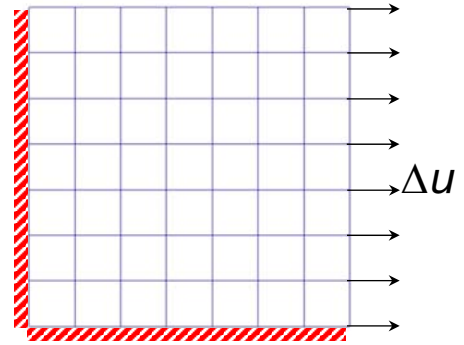
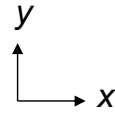
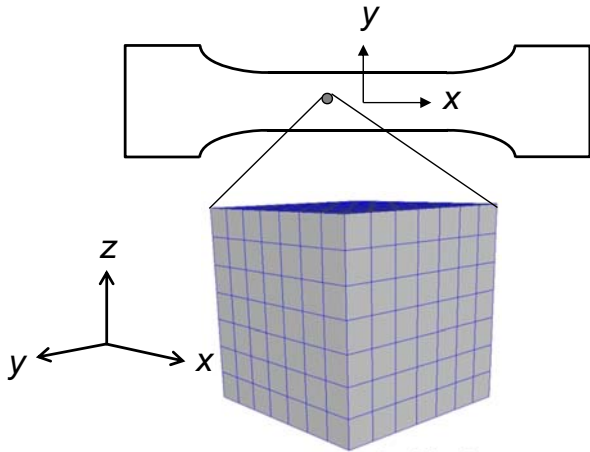
Mayama, et al., Comput. Mater. Sci. 47 (2009), 448.

結晶塑性モデル

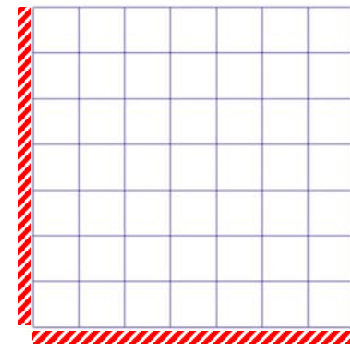
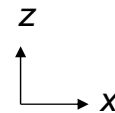


Graff, et al., Int. J. Plast. 23 (2007), 1957.

解析モデル



- 一辺10mmの立方体を各方向に7分割
- 8節点ソリッド要素 (SRI)
- $x=10$ の面に変位境界条件
- $x=0, y=0, z=0$ の各面に対称面境界条件

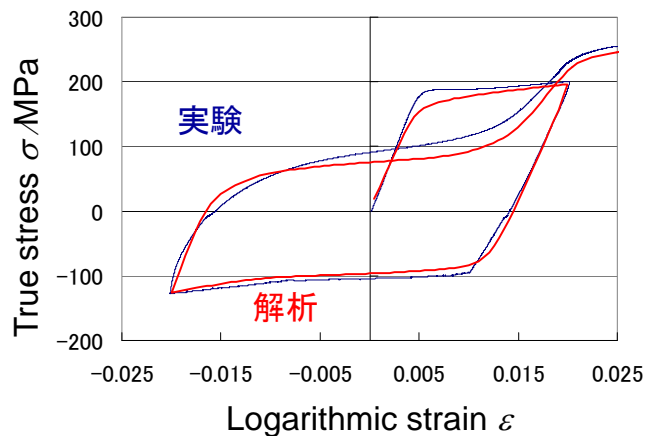
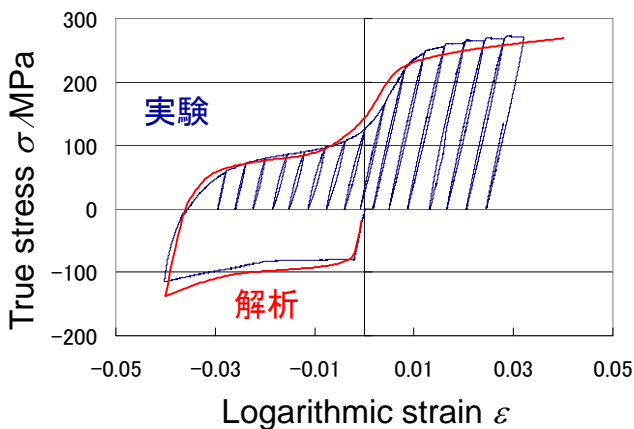


Mayama, et al., Comput. Mater. Sci. 47 (2009), 448.

反転負荷解析

2%引張-4%圧縮-引張

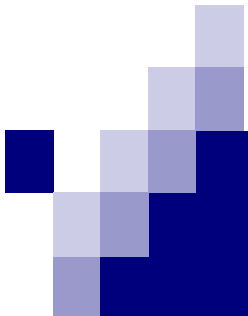
4%圧縮-引張



いずれの変形経路でも実験と解析でよい一致が見られる

Hama, T. & Takuda, H., Int. J. Plasticity, 27 (2011), 1072.

Hama, T., Kitamura, N. & Takuda, H., Mater. Sci. Engng., A 583 (2013), 232.



中性子計測による、 塑性加工シミュレーションの革新

結晶塑性解析の課題と展望

現状の課題：

- 転位の相互作用を考慮したすべり抵抗モデルの確立
- 単結晶または結晶粒内の現象の正確な捕捉
- 結晶粒界での転位の運動のモデル化
- 上記各項目に対し、実験的検証が十分にできていない



上記を解決するために計測したいもの：

- 結晶方位分布、転位密度、結晶粒径、格子ひずみ(残留応力)、塑性ひずみ分布、介在物、ボイド
- 以上を、対象物を塑性変形させながらその場観察したい

塑性加工シミュレーション 高度化のストーリー

