

(論文)

# 均質化弾塑性FEMによるDual-phase鋼のマルチスケール強度解析

黒澤瑛介\*<sup>1</sup> (博士(工学))

## Multiscale Elasto-plastic Finite Element Analysis of Dual-phase Steel Based on Homogenization Method

Dr. Eisuke KUROSAWA

### 要旨

Dual-phase 鋼を代表とする高張力鋼材はさまざまな分野で使用されている。このような高張力鋼材に対して、微視的な内部組織形態と巨視的な機械的特性との相関の解明に向けた研究が数多くなされている。本検討では、フェライト/マルテンサイトからなるDual-phase 鋼およびそれを構成する各相と同等の特性を有する単相材料を製作し、材料試験によって機械的特性データを取得した。この試験データをイメージベースモデリングにより作成したマイクロ組織の解析モデルに反映させるとともに、均質化弾塑性理論に基づいて構築したFEMコードを用いてマルチスケール強度シミュレーションを実施した。解析結果と実験結果とを比較したところ、本開発手法の妥当性と有効性が確認できた。

### Abstract

High tensile steel, such as dual-phase steel consisting of ferrite and martensite, is still widely used in several industries. From a research and development point of view, it is important to clarify the relationship between microstructure and macroscopic mechanical properties. In this study, samples of dual- or single-phase steel consisting of similar constituent phases were experimentally produced, and their tensile properties were obtained by material testing. These data were introduced into the microstructure model generated by an image-based modeling method using SEM observation imaging. Using this model, multiscale FE simulation based on homogenization elasto-plasticity theory was conducted, and validation was investigated by comparison with experimental results.

### 検索用キーワード

マルチスケールシミュレーション, Dual-phase 鋼, 機械的特性, 材料組織, イメージベースモデリング, 均質化法, 弾塑性理論

まえばき = 自動車などの輸送機の軽量化ニーズへの対応をはじめとする高張力鋼材の開発が活発に進められている。その代表的な材料としてフェライト・マルテンサイト相から構成されるDual-phase 鋼（以下、DP 鋼という）が挙げられる。このような高張力鋼材では、内部組織制御による材料特性の向上が図られており、機械的特性や成形性、延性破壊挙動といった巨視的材料特性に及ぼす微視組織影響の解明に向けた研究が数多くなされている<sup>1)~3)</sup>。その有効な手段として近年、マルチスケールシミュレーションによる評価が注目を集めている。しかしながら、鋼材を対象とした解析事例はまだ少なく<sup>4), 5)</sup>、材料特性と組織形態との相関を体系的に整理されるまでには至っていないのが現状である。

本検討では、DP 鋼を対象に、材料試験による構成相ごとの機械的特性データの取得、ならびに組織観察結果を忠実に再現した解析用メッシュモデル生成を試みた。また、均質化弾塑性理論<sup>6), 7)</sup>に基づく大変形有限要素 (FE) シミュレーションコードを構築し、上記データを用いたマルチスケール強度解析を実施した<sup>8)</sup>。本稿では、得られた解析結果を実験結果と比較し、開発手法の妥当性と有効性について検討した内容について述べる。

## 1. 材料試験

### 1.1 供試材

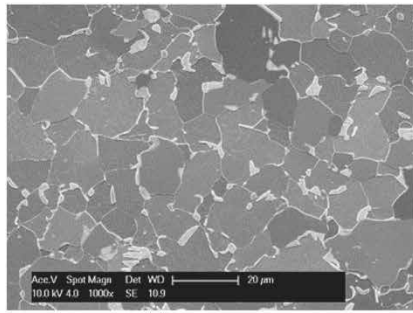
DP 鋼材、およびそれを構成する各相と同等の性質を有する単相材の試料を製作した。まず、20 kg の真空誘導溶解炉により、狙いの組成となるように成分調整した3種類のインゴットを溶製した。このときのそれぞれのインゴットの組成を表1に示す。溶製したインゴットを1,150℃×30分以上加熱した後、800℃にて約φ10×L150 mmの丸棒形状に鍛造成形した。さらに、ソルトバス炉を用いて表1に示す条件で熱処理を施し、ベンチマーク試験用の試料3種を得た。各試料の内部組織の

表1 供試材の組成と熱処理条件

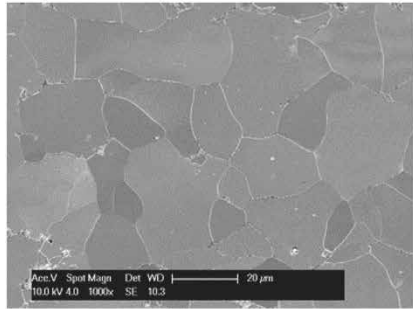
Table 1 Composition and heat treatment condition of each steel sample

| Sample         | Composition (wt%) |      |      | Heat treatment condition       |
|----------------|-------------------|------|------|--------------------------------|
|                | C                 | Si   | Mn   |                                |
| (a) Dual-phase | 0.063             | 0.50 | 1.46 | 800℃·30min<br>650℃·10min<br>WQ |
| (b) Ferrite    | 0.032             | 0.43 | 1.37 | 880℃·30min<br>AC               |
| (c) Martensite | 0.49              | 0.59 | 1.59 | 880℃·30min<br>WQ               |

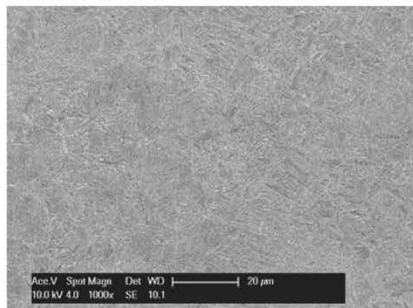
\*1 技術開発本部 機械研究所



(a)Dual-phase



(b)Ferrite



(c)Martensite

図1 供試材のSEM観察結果

Fig.1 SEM image of each steel sample

SEM観察画像を図1に示す。

また、EPMAによってマルテンサイト相内の固溶炭素量を分析したところ、DP鋼試料(図1(a))では平均0.40 wt%であったのに対して、マルテンサイト単相試料(図1(c))でも平均0.49 wt%であった。このことから、ほぼ同等の相特性を有する材料が得られたものと判断した。

さらに、図1(a)の組織写真の画像解析によりDP鋼試料におけるマルテンサイト相の面積分率を算出した結果、10~15%であった。

## 1.2 引張試験

前節の各試料から、標点間距離12.5 mm、板幅3 mm、板厚1.2 mmの薄板試験片を複数切り出した。この試験片を対象に、クロスヘッド変位速度1 mm/minおよび室温環境下という条件で万能試験機を用いて引張試験を実施した。

得られた各試料の公称応力-公称ひずみ線図を図2に示す。DP鋼およびフェライト単相材については再現性のあるデータが得られた。今回製作したDP鋼の引張強度は600 MPa弱であった。いっぽう、マルテンサイト単相材は極めて脆性(ぜいせい)的な挙動を示し、極低ひずみ域(最大でも公称ひずみ1.4%程度)で破断に至る結果となった。

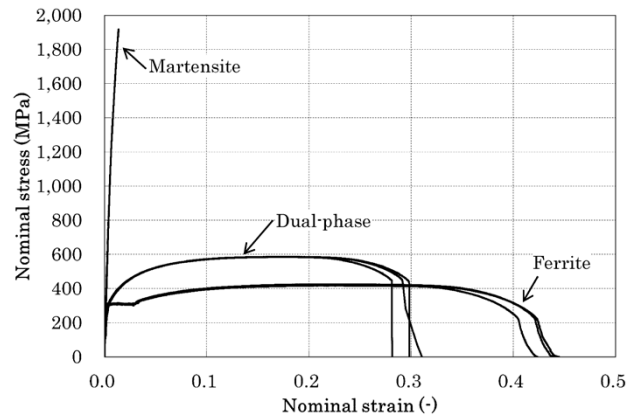


図2 各鋼材サンプルの公称応力-公称ひずみ線図

Fig.2 Nominal stress vs. nominal strain curves of each steel sample

## 2. 均質化弾塑性理論に基づく定式化

異なるスケールの力学挙動を連成して解析するための数値解析手法の一つに、均質化法<sup>6), 7)</sup>が挙げられる。均質化法では、マイクロ構造とマクロ構造の支配方程式が物理的・数学的整合性を満足しており、マイクロ構造内の任意の幾何形状にも対応できる汎用(はんよう)性がある<sup>6)</sup>。そこで本検討では、大変形弾塑性問題に拡張された均質化理論<sup>6), 7)</sup>に基づき、FEシミュレーションを実施するための定式化を試みた。

任意の物質点における変位速度ベクトル $\dot{u}$ は次式のように加算分解できるものとする。

$$\dot{u} = \dot{u}^0 + \dot{u}^* \dots \dots \dots (1)$$

ここで、右上付きの0および\*はそれぞれ、均一なマクロ成分およびそれからのじょう乱成分を表す。マクロ成分はマイクロ構造に対して一様に作用するものとし、じょう乱成分はマイクロ構造の不均質性に起因する量である。

均質化法では、じょう乱成分がマイクロ構造の単位構造に対応するユニットセル $Y$ に分布しており、この $Y$ が周期的に配置されている状態を考える。このような周期性は $Y$ -周期性と呼ばれ、じょう乱成分 $\dot{u}^*$ が周期的に変化する関数であれば、得られるマクロな応答は各種力学整合性を満足することが一般に知られている<sup>6)</sup>。

大変形理論に基づくマイクロ構造の材料構成則として次式を採用した。

$$\check{\sigma} = C^{ep} : D \dots \dots \dots (2)$$

$$\check{\sigma} \equiv \check{\sigma} - L\sigma - \sigma L^T \dots \dots \dots (3)$$

ここに、

- $\sigma$  : ミクロCauchy応力テンソル
- $\check{\sigma}$  : ミクロCauchy応力テンソルの上対流微分
- $C^{ep}$  : ミクロ等方弾塑性係数テンソル
- $D$  : 変形速度テンソル
- $L$  : 変位速度こう配テンソル

なお、塑性構成式には関連流れ則、マイクロ構造を構成する各相の降伏判定にはMisesの降伏条件を用いた。Ohno<sup>7)</sup>らによる大変形の枠組み内における均質化理論に沿えば、マイクロ構造の支配方程式は式(4)、マクロ

構造の均質化弾塑性構成則は式 (5) のように導出できる。

$$\int_Y \left\{ \frac{1}{2} C_{ijmn}^{ep} (\dot{\chi}_{m,n}^{<kl>} + \dot{\chi}_{n,m}^{<kl>}) \delta \dot{u}_{i,j}^* + \dot{\chi}_{i,m}^{<kl>} \sigma_{m,j} \delta u_{i,j}^* \right\} dY = \int_Y C_{ijkl}^{ep} \delta \dot{u}_{i,j}^* dY \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$\dot{\Sigma} = C^{epH} : D^0 \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$C_{ijkl}^{epH} \equiv \frac{1}{|Y|} \int_Y (C_{ijkl}^{ep} - C_{ijmn}^{ep} \dot{\chi}_{m,n}^{<kl>}) dY \quad \dots \dots \dots (6)$$

$$\dot{u}_i^* = \dot{\chi}_i^{<kl>} D_{kl}^0 \quad \dots \dots \dots (7)$$

ここに、

- $\dot{\chi}_i^{<kl>}$  : 特性変位速度ベクトル
- $\delta \dot{u}_i^*$  : じょう乱変位速度の仮想変分ベクトル
- $\dot{\Sigma}$  : マクロ Cauchy 応力テンソルの上対流微分
- $C^{epH}$  : 均質化されたマクロ弾塑性係数テンソル
- $D^0$  : マクロ変形速度テンソル
- $|Y|$  : ミクロ構造のユニットセル体積

式 (4) を離散化することにより、ミクロ構造内の特性変位速度を求めるための要素剛性方程式が得られる。同式より求まる特性変位速度は、均一なマクロ変形情報をミクロ構造側の境界値問題に与えた場合のじょう乱応答に対応する。いっぽう、ミクロ構造内の不均質情報は、式 (6) より特性変位速度の空間微分を介してマクロ応答に反映され、ミクロ/マクロの異なるスケールにおける整合性を満たしつつ、両スケールにおける応答解を得ることが可能となる。

### 3. DP鋼材のマルチスケール強度解析

2章で示した定式化に基づく均質化弾塑性FEシミュレーションコードを作成し、DP鋼材を対象としたマル

チスケール強度解析を実施した。本章では、その結果と1章の材料試験結果を比較し、開発手法の妥当性や有効性について検討した内容について述べる。

#### 3.1 DP鋼ミクロ組織の解析モデル

図1(a)の組織画像を用いたイメージベースモデリングにより、ミクロ構造のユニットセルのメッシュモデルを作成した。図3に示すように、SEM画像の二値化処理によりマルテンサイト相を抽出し、ノイズを除去したうえで外周表示することによって同相の形状データを作成した。これを4辺形双1次要素によるメッシュ分割を行った後、奥行き方向に1層設けることにより、6面体双1次要素(8節点アイソパラメトリック要素)を用いて分割した3次元メッシュモデルとした。このメッシュ分割により、総要素数40,279、総節点数81,014のユニットセルFEモデルを得た。

以上の単位ミクロ構造が図4のように周期的に配置されていると仮定し、ユニットセルにはじょう乱変位成分に対して周期境界条件を与えた。ユニットセルを構成する各相の応力-ひずみ関係については、図2の引張試験結果を真応力-塑性ひずみ関係に変換し、さらにそれを多点近似したデータによって与えた。なお、各相の破壊については考慮しなかった。すなわち、マルテンサイト単相材の破断限界ひずみ以降の応力値については、引張試験結果をべき乗則でフィッティングした曲線を適用して得られたデータを用いた。

いっぽう、マクロ構造は一様変形を仮定した。そのうえで、ミクロ構造の境界値問題への入力データとして、ユニットセル内の全積分点に対して増分計算ステップごとに引張試験に対応した一軸引張相当のマクロひずみ増

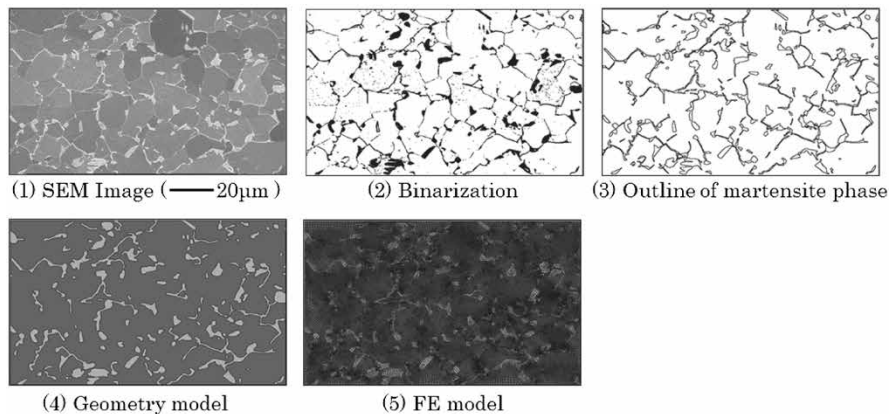


図3 ユニットセルメッシュモデルの生成手順  
Fig.3 Generation process of FE model for unit cell

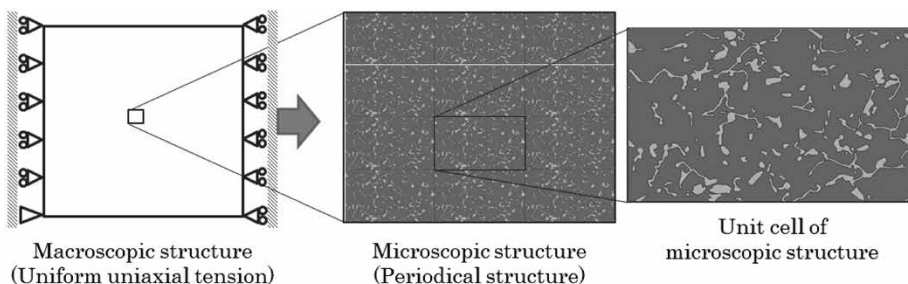


図4 解析モデル  
Fig.4 Analytical model

分を付与した (図4)。

### 3.2 マルチスケールシミュレーション結果

前節の解析モデルによるマクロ構造側の真応力-塑性ひずみ曲線のシミュレーション結果と実験結果との比較を図5に示す。プロット付きの実線は各相に与えた入力データである。また、プロットなしの実線および破線はそれぞれ、DP鋼の実験結果および本シミュレーション結果を示す。フェライト単相に比べてDP鋼の方が内部に含まれるマルテンサイト相の影響により応力値や見かけの加工硬化率が上昇する傾向を再現できており、定量的にも実体に近い応力-ひずみ関係の予測結果が得られた。

本シミュレーションにより、マイクロ構造内の力学挙動を評価した例として、伸び率20%時におけるユニットセルの変形図を図6、相当塑性ひずみ分布を図7、Mises応力分布を図8に示す。フェライトに囲まれたマルテンサイト相が引張方向に引き伸ばされ、塑性変形はマルテンサイト相が密集した領域近傍のフェライト相において集中した様相を呈していた。内部応力に関しては、硬いマルテンサイト相内で高い値を示しており (図8 (a))、フェライト相側に着目すれば、塑性変形量が大きい領域において高応力となっていることが確認できる (図8 (b))。いっぽう、図7を見ると、マルテンサイト相においても数パーセントオーダの塑性ひずみが発生している。すなわち、極低ひずみ域で破断する単相材に比べて、DP鋼の場合の方がマルテンサイト相の変形能が大幅に高いと示唆されるシミュレーション結果であった。

### 3.3 引張試験後の試験片のSEM観察

前節のシミュレーション結果との比較を行うため、DP鋼の試験片を対象に引張試験後の破断面 (くびれ部) 近傍の組織を観察し、フェライトおよびマルテンサイトの各相の変形後における形状や特徴を調査した。図9に示すように、マルテンサイト相は周りのフェライト相の塑性変形の影響も大きく受けて引張方向に引き伸ばされた様相を呈している。これは、シミュレーション結果と同様の傾向であった。すなわち、単相試料の引張試験での破断限界ひずみを超える塑性変形が発生したことが示

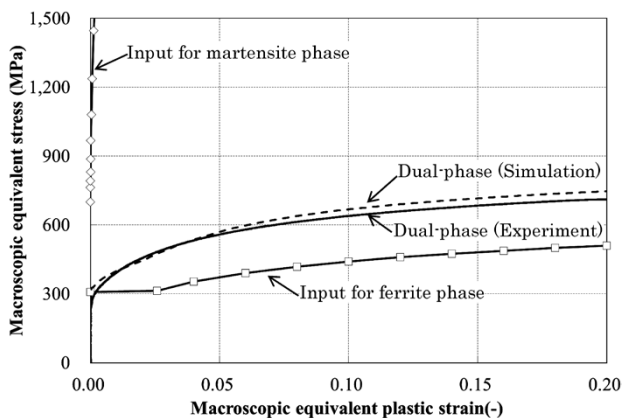


図5 マルチスケールシミュレーションで得られたマクロ応力-ひずみ線図

Fig.5 Macroscopic stress-strain curves obtained by multiscale simulation

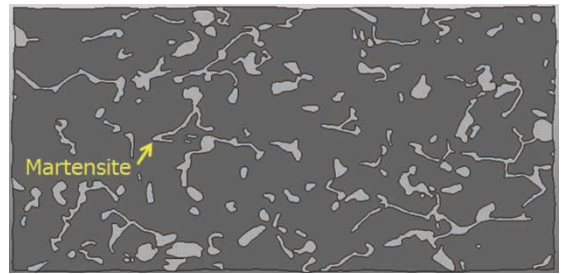


図6 ユニットセルの変形図 (伸び率20%時)  
Fig.6 Deformation of unit cell (at 20% elongation)

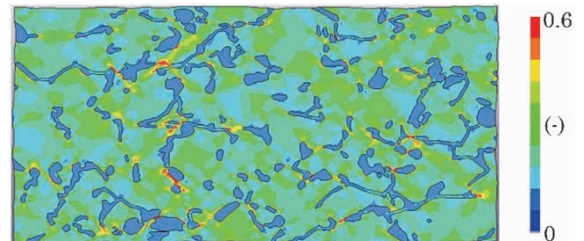


図7 相当塑性ひずみ分布 (伸び率20%時)  
Fig.7 Distribution of equivalent plastic strain (at 20% elongation)

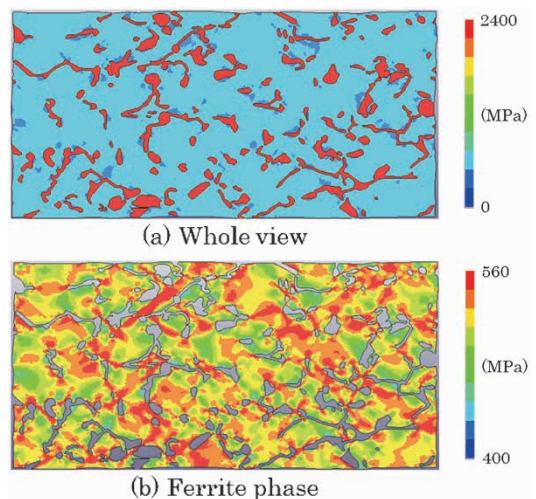
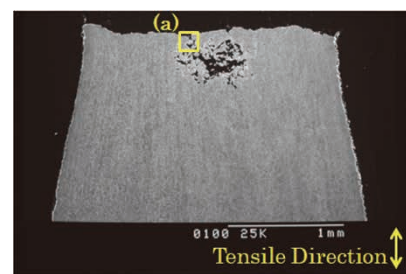
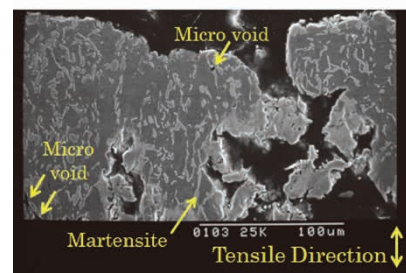


図8 相当応力分布 (伸び率20%時)  
Fig.8 Distribution of equivalent stress (at 20% elongation)



Near fracture region



Enlarged view of region (a)

図9 試験片破断面近傍のSEM観察結果  
Fig.9 SEM image of near fracture region in specimen

峻される結果であった。単相試料およびDP鋼いずれも巨視的には同じ軸引張を受けている。しかしながらDP鋼内のマルテンサイト相では、周りのフェライト相の有無とその変形状態によって、微視的には多軸応力場へと変化した。このため、単相試料の場合に比べて破断前に大きな塑性ひずみが生じたものと推測される。多軸応力場が構成されるメカニズムの解明は今後の課題とし、開発したマルチスケールシミュレーションも援用しての詳細な突合せ評価を実施していく予定である。

また、マルテンサイト相が密に集中している領域を中心に、異相界面近傍のフェライト相にマイクロポイドが多数観察されており、これらのポイドが連結して破断に至ったものと推察される。すなわち、破断に至るまでのフェライト相側の微視的な塑性変形挙動についても、前節のシミュレーション結果と同様の傾向を示していた。

以上より、今回開発したマルチスケールシミュレーション手法は巨視的な機械的特性の予測に加え、内部組織に起因する微視的な不均質変形挙動も同時に解析できる有効な手法であるといえる。

**むすび** = 本検討では、フェライト／マルテンサイト相からなるDP鋼を対象に、均質化弾塑性理論に基づく大変形FEシミュレーションによるマルチスケール強度解析を実施した。解析にあたっては、ベンチマーク対象の

DP鋼材を構成する各相と同等の特性を有する単相試料の材料試験データを取得した。さらに、SEM観察画像に基づくイメージベースモデリングによって材料内部のマイクロ組織形態情報を解析モデルへ反映した。その結果、実体に近いマクロ応力-ひずみ関係の予測、およびマイクロ組織レベルの力学挙動の同時解析が可能となり、材料特性と内部組織形態の相関解明に向けて一歩前進した。

今後は、実用部材レベルの強度特性や材料の延性破壊挙動に及ぼすマイクロ組織形態の影響評価の実現に向けて、本マルチスケール解析手法の高度化を図る予定である。

#### 参 考 文 献

- 1) 石黒太浩ほか. 鉄と鋼. 2011, Vol.97, No.3, p.136-142.
- 2) 庄司博人ほか. 溶接学会論文集. 2015, Vol.33, No.4, p.341-348.
- 3) H. Toda et al. Acta Materialia, 2017, Vol.126, p.401-412.
- 4) 大畑 充ほか. 鉄と鋼. 2013, Vol.99, No.9, p.573-581.
- 5) R. Rieger et al. Archive of Applied Mechanics. 2015, Vol.85, p.1439-1458.
- 6) 寺田賢二郎ほか. 日本機械学会論文集(A編). 1995, Vol.61, No.590, p.2199-2205.
- 7) N. Ohno et al. Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2002, Vol.50, No.5, p.1125-1153.
- 8) 黒澤瑛介ほか. 日本材料学会学術講演会講演論文集. 2018, Vol.67, p.293-294.