

## I-24 鋼の微視な構造に起因する巨視的弾塑性特性

|            |     |         |
|------------|-----|---------|
| 東北大学       | 学生員 | ○ 及川 兼司 |
| 東北大学       | 学生員 | 松井 和己   |
| 東北大学       | 正員  | 寺田 賢二郎  |
| 住友金属工業 (株) |     | 秋山 雅義   |
| 住友金属工業 (株) |     | 久保木 孝   |

## 1. まえがき

繰り返し载荷による金属材料の代表的な力学挙動としてバウシinger効果が広く知られている。これまでにバウシinger効果は、材料実験をもとに組み立てられた複雑な降伏条件や構成則によって表現されていた。これに対して本研究では、材料の本質を決定づけると考えられるミクロ構造に着目し、マルチスケール解析<sup>1)</sup>を行うことでこの未解明な弾塑性挙動のメカニズムの解明を試みる<sup>2)</sup>。

## 2. 解析条件と構造のモデル化

本研究では2次元の平面ひずみを仮定し、構成材料の弾塑性挙動については、非線形の等方硬化のみを仮定した  $J_2$  塑性理論に従うものとする。今回対象とする鋼のミクロ組織は、図-1の写真に示すように、フェライト (Fe, 写真の黒い部分) とセメンタイト ( $\text{Fe}_3\text{C}$ , 写真の白い部分) から構成されている。フェライト部の材料定数は、単層組織に対する材料実験のデータをもとにキャリブレーションを行った。またセメンタイト部の材料特性については、その単層組織の実験が困難なため資料<sup>3)</sup>を参照した。ただし、セメンタイトの初期降伏応力はフェライトのそれに比べてはるかに大きいため、セメンタイトは塑性変形しないものとした。

マクロ構造に対する载荷条件を一様な引張・圧縮の繰り返し载荷とし、ミクロ構造に図-1に示す有限要素モデルを用いて弾塑性マルチスケール解析を行った。

## 3. 解析結果と考察

マルチスケール解析および材料実験によって得られた巨視的な応力・ひずみ曲線を図-2に示す。ミクロ構造を構成する材料の構成関係としては等方硬化則のみを仮定しているにもかかわらず、解析結果においても実験結果と同様にバウシinger効果が確認できる。この結果は、鋼が微視的な「構造」を有することによるものであり、以下では解析結果を微視的な視点から考察する。まず図-2中の各状態 a, b, c におけるミクロ領域での von Mises 応力分布を図-3、状態 a における相当塑性ひずみ分布および状態 b, c において再降伏によって新たに生じた相当塑性ひずみ分布 (状態 a の相当塑性ひずみを差し引いたもの) を図-4に示す。

まず図中の領域 A に注目すると、引張载荷によって大きな応力が生じそれに伴って塑性ひずみが大きく蓄積していることがわかる。また巨視的な除荷 (a→c) の際にはミクロ応力が次第に減少し、新たな降伏が生じていないことがわかる。

これに対して領域 B では状態 a における応力値が低く、ほとんど塑性ひずみが生じていない。しかしながら巨視的な除荷の際にマクロ応力が減少しているにもかかわらず、領域 B でのミクロ応力は増加し、これに伴って新たな塑性ひ

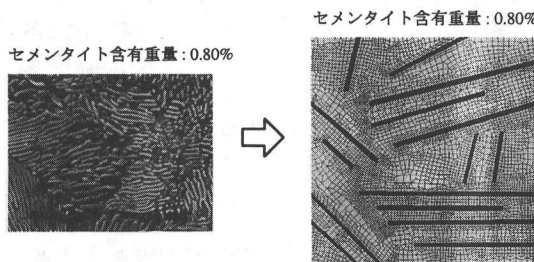


図-1 ミクロ構造のモデル化

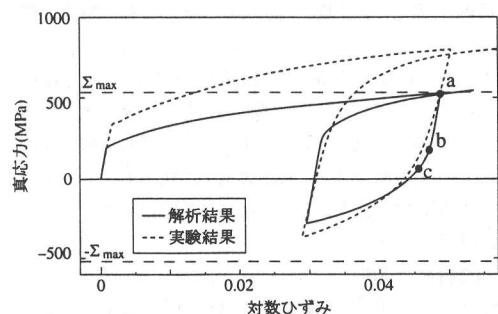


図-2 実験、解析により得られた応力・ひずみ曲線

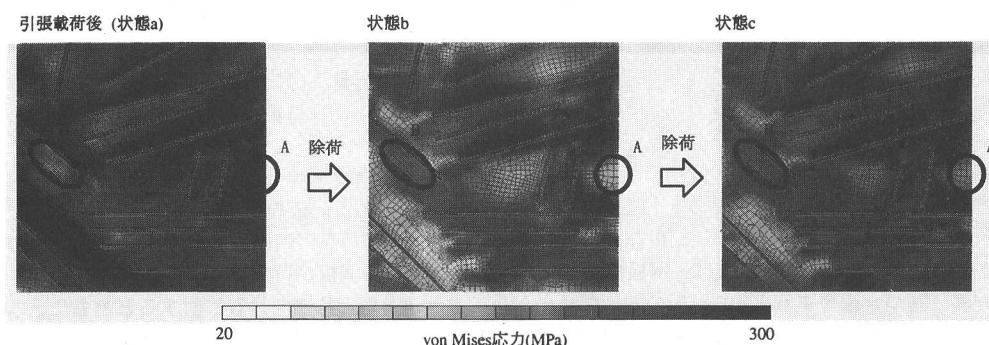


図-3 von Mises 応力分布

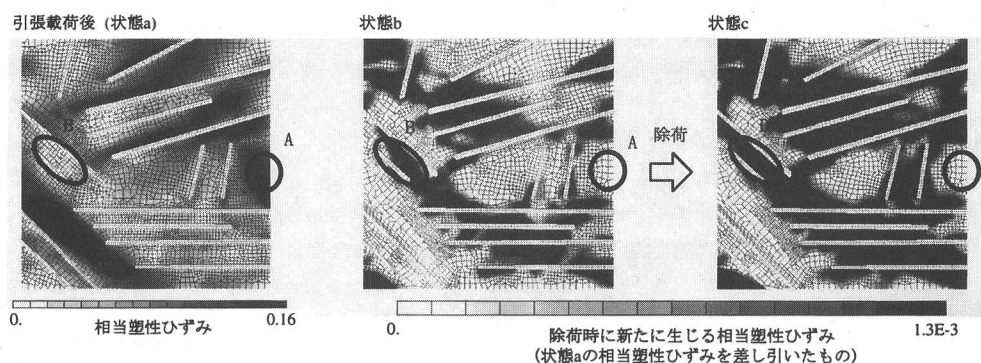


図-4 相当塑性ひずみ分布

ずみが生じている。また、この時の降伏応力はフェライトの初期降伏応力に極めて近く、状態 a のときの領域 A で生じている応力よりもはるかに小さなものである。

以上のようなマイクロ領域における複雑な力学現象がマクロ挙動に反映され微視的領域で新たな降伏が生じる状態 b 付近で巨視的な降伏が生じているように見える。つまりバウシinger効果は、「引張载荷による硬化が小さいフェライト部が除荷に伴うマイクロ応力の変化により、マクロ応力が  $\Sigma_{\max}$  (図-2 に示す) に達する前にマイクロ領域で塑性変形を開始すること」であると考えられる。

#### 4. まとめ

弾塑性マルチスケール解析によって得られた巨視的な応力・ひずみ曲線が、実験結果と定性的に一致していることが確認できた。つまり、材料実験などで観察されるバウシinger効果をはじめとした鋼の弾塑性挙動は、これまでに説明したようなマイクロ領域における複雑な力学現象を反映したものであるといえる。したがって、これまで提案されてきた複雑な構成則や硬化則を用いずに、弾塑性マルチスケール解析によってマイクロ領域での力学挙動を正確に評価した巨視的な力学挙動を表現できる。また、このように巨視的な材料特性を同定できるだけでなく、実験で観察することが困難なマイクロ領域での力学挙動を数値的に評価することにより材料設計に有用な情報を提案し得るものと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 寺田賢二郎, 菊池昇: 非均質弾塑性体のマルチスケール解析のための一般化アルゴリズム, 土木学会論文集, No.633/I-49, pp.217-299, 1999.
- 2) 松井和己, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 岩熊哲夫: 弾塑性複合材料のマイクロ構造を反映した巨視的な降伏曲面の評価, 土木学会論文集, (投稿中).
- 3) T.Ya Kosolapova, *Carbides*, Plenum Press, 1971.