



巨視的载荷状態下における炭素鋼の 微視的降伏挙動の解析

秋山 雅義*・松井 和己*²・寺田 賢二郎*³

Analysis of Microscopic Yielding Behaviour of Carbon Steel under Macroscopic Loading

Masayoshi AKIYAMA, Kazumi MATSUI and Kenjiro TERADA

Synopsis : Interaction between the microscopic and macroscopic behaviours of pearlite steel was investigated using the homogenization method and elastic-plastic finite element method. Attention was focused upon the microscopic yielding under macroscopically elastic loading state on the tension side. Tangent of macroscopically elastic line at the initial stage of the stress-strain diagram was precisely examined to find that microscopic yielding occurs in the microstructure although macroscopic state is elastic. The zone where microscopic yielding is achieved does not expand throughout the unloading process to the macroscopically-zero stress level, but it expands when the macroscopic stress level exceeds a threshold level in the inverse loading process. The absolute value of this threshold level is equal to the threshold level above which microscopic yielding appears in the initial loading on the tension side. Cyclic loading test was applied to specimens in a laboratory and increase in specimen temperature was measured to check the qualitative validity of the numerical investigation.

Key words: microscopic yielding; macroscopic yielding; interaction; homogenization method; finite element method; microscopic inelastic behaviour; macroscopic inelastic behaviour; pearlite steel; ferrite; cementite.

1. 緒言

降伏条件という言葉が、弾性状態にある材料が、ある载荷条件の下で塑性変形等の非弾性状態に移行するために必要な力学的条件を表す言葉として使われてから久しい。降伏条件にはいろいろな種類があるが、塑性加工の現場では、ミーゼスの降伏条件¹⁾等が長く使われてきている。ところで、降伏というのが材料が弾性状態から塑性状態への遷移を表す言葉であるとしても、材料の実挙動における降伏現象は、余り明確な定義の下には扱われて来なかった。即ち、降伏点あるいは降伏応力を決める方法は、機械的引張試験を行い、応力-ひずみ線図を描いてその線図上で決めるのが一般的であるが、この様に決められる点を巨視的降伏点と呼ぶとすれば、巨視的降伏点は、例えば炭素鋼の場合は上降伏点、下降伏点、あるいは0.2%耐力、等の点で決められている²⁻³⁾。そして、これらの定義の下に測定された降伏応力等は、設計現場等でそれなりの意味を持って有効に使われて来ている。しかしながら、降伏という言葉の定義に厳密に従うならば、応力-ひずみ線図上において弾性状態からの逸脱が開始された点を巨視的降伏点とするべきであり、その意味で、現場で用いられているこれらの定義は降伏の厳密な定義とは相容れないものである。応力とひずみが応力-ひずみ線図上で初期状態から線形関係を保っ

ている限界として定義される比例限を巨視的降伏点とするのが良いとも考えられるが、比例限も結局は官能的に決められることを考えれば、巨視的降伏点をどの様に決めるべきかは難題である。

視点を变えて、鋼等の金属材料は通常は多結晶体で、炭素鋼のミクロ組織は普通はフェライトとセメンタイト等二相以上の組織が入り組んで構成される複合材料と見ることが出来るので、材料が巨視的降伏以前の状態でも、ミクロ組織の一部は応力集中などが原因で降伏状態にある可能性がある。この状態を微視的降伏状態と呼べば、巨視的降伏状態以前の材料でも、微視的降伏状態にある場合が存在する。なお、ここで言う微視的とは、数十 μm ～数百 nm 程度の領域を視覚的に観察する場合に用いる用語である。微視的降伏状態が巨視的降伏状態に先行することを裏付ける結果として、巨視的降伏点前の载荷状態でエッチピット法を駆使して、微視的降伏状態の存在を示唆した研究がある⁴⁾。また、筆者らは、階層構造を持つ材料の巨視的応答と微視的応答の相互作用を解析するためのマルチスケール法⁵⁾と呼ばれる一群の計算手法の一つである均質化法⁶⁾を用いて、弾塑性有限要素法を用いて行った巨視的領域と微視的領域の解析を結び、フェライト中に形態の異なるセメンタイトが分布する材料の挙動を解析し、パウシンガー効果⁷⁾の発生メカニズムを力学的に説明する試みを行ってい

平成17年4月18日受付 平成17年6月22日受理 (Received on Apr. 18, 2005; Accepted on June 22, 2005)

* 住友金属工業(株)総合技術研究所 (Corporate R&D Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1-8 Fuso-cho Amagasaki 660-0891)

* 2 横浜国立大学大学院環境情報研究院 (Graduate School of Environment and Information Science, Yokohama National University)

* 3 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (Department of Civil Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University)

る^{8,9)}。これらの研究では、金属の巨視的変形に伴う微視的塑性変形の進展の様態を、視覚的に追う形で説明しようとしている。これらの研究は、金属中の個々の格子欠陥に焦点を当てるのではなく、それらの集団が群として行動をした場合に巨視的にはどのような挙動を示す様に見えるかという観点で金属を連続体として扱う立場から行われており、その結果を、転位等格子欠陥の動きから降伏現象や塑性変形の進展を論ずるミクロ的視点から材料を見る研究の成果と対照することで、金属の巨視的変形メカニズムと微視的変形メカニズムの相互作用が将来的に明らかになると期待される。

ところで、上述の筆者らの研究では、巨視的降伏発生後の現象であるバウシinger効果に関する力学的観点からの論述はされているが、巨視的降伏に先だって微視的降伏がどのように起こるのか、ということは論じられていない。本論文ではこの点に焦点を当て、巨視的降伏現象に対して微視的降伏現象が先行することがある可能性を均質化法と弾塑性有限要素法を用いた解析で説明し、その上で微視的降伏現象が進展する間に巨視的状态がどのように推移するのか、更に巨視的降伏現象が目に見える形で応力-ひずみ線図上に現れるのは微視的領域にどのような変化が起こった時かを、連続体力学的観点から説明することを試みる。従来の研究同様、二相組織であるパーライト単独の挙動を解析することでこの試みを行う。更に、巨視的降伏現象に先だって現れる微視的降伏を起こした領域が、巨視的降伏前に除荷された時の挙動を調べ、続いて逆負荷をされた場合の挙動を求め、巨視的弾性範囲であっても微視的降伏が起こる範囲を超えた初期負荷の後に除荷と逆負荷をすることで、微視的塑性変形が進展することを述べる。この計算結果の傍証として、疲労試験時に試験片温度が上昇する現象¹⁰⁾を用いて、微視的降伏は起こるが巨視的降伏点以下である巨視的交番応力を繰返し負荷することで、試験片温度が上昇することを確認した。詳細を以下に述べる。

2. 解析モデル

対象をフェライトとセメンタイトで構成される二相組織として、Fig. 1に微視的領域の2次元メッシュを巨視的領域の要素と対比して示す。これは従来の研究で用いたメッシュ^{8,9)}と同一のものである。棒状に見えるのがセメンタイト、その他の領域がフェライトを想定しており、二つの相の境界での相互滑りは許していない。巨視的領域を構成する1つの四角形要素の各積分点でミクロ領域のメッシュが想定されている。

ここで簡単に解析の流れを説明する。巨視的領域を構成する要素を用いて有限要素法解析を行い、その結果として得られる各積分点におけるマクロなひずみと応力を求める。このひずみの値を微視的領域の有限要素メッシュ全体

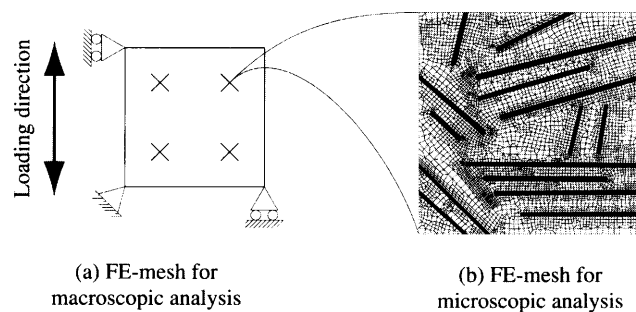


Fig. 1. Finite element meshes for microscopic and macroscopic analyses.

に拘束条件として与えて、今度は微視的領域での有限要素解析を行い、その結果として得られる微視的領域の平均的な応答を求め、その結果としての応力を巨視的領域の有限要素法解析のための積分点の応力と考え直して、巨視的領域の有限要素法解析をやり直し、巨視的領域の全体的な応答を計算し直す。その結果を、上記と同じように、各積分点で微視的領域に戻してやる。この手順を、解の収束が得られるまで繰り返すというのが一連の計算の手順である。つまり、微視的領域の平均的な応答が巨視的領域の応答を支配する、という考え方に基づいた一連の計算が、収束に至るまで繰り返されることになる。

この一連の計算手順に基づいた解析プログラムを用いて、巨視的要素を一軸方向に引張り、その時に発生する微視的領域と巨視的領域の挙動を、続いて除荷、更に逆負荷した場合について、同じく挙動を、それぞれ調べた。最初の引張負荷で、巨視的応力-ひずみ線図の傾きを見ながら巨視的降伏点を特定し、併せて巨視的降伏現象発現に至るまでの微視的領域の挙動を調べた。次に、微視的降伏は発現しているが巨視的降伏前である状態から除荷し、続いて逆負荷を行い、微視的降伏領域がどのような挙動をするかを調べた。逆負荷の際に与えた巨視的圧縮応力は、絶対値で最初の引張で巨視的降伏現象が起こる巨視的引張応力の値より小さく設定した。即ち、巨視的弾性範囲での交番負荷下における微視的領域の塑性変形領域の進展を観察した。

材料の機械的性質については次の様に設定した。フェライト地は、従来の研究同様^{8,9)}、Fig. 2に示す巨視的引張試験で得られたフェライト単相材の応力-ひずみ線図を適用した。これは casting 後に熱間鍛造をし、ひずみ取り焼鈍を施した多結晶フェライト単相材の巨視的な引張試験で得られた応力-ひずみ線図であり、Fig. 1の微視的領域のフェライト地がこの応力-ひずみ線図に従うかどうかについては議論があるところであるが、現在のところは精密に測定された微視的領域のフェライトの応力-ひずみ線図が世の中に無いために、次善の策として筆者らが測定したこの応力-ひずみ線図を用いている。微視的領域でのフェライトの挙動についての研究もある¹¹⁾が、それが巨視的な機械的特性と結びついた形には未だないないので、ミクロ領

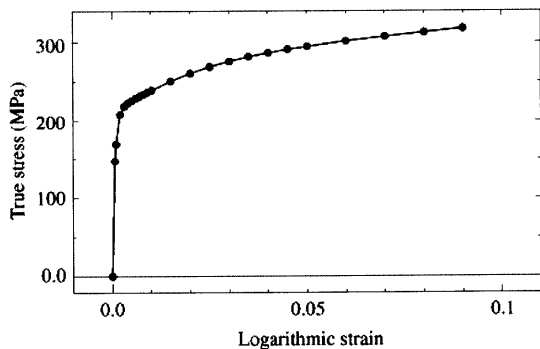


Fig. 2. Stress-strain curve applied to ferrite matrix in microstructure.

Table 1. Elastic constants of cementite used in numerical analysis.

	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Yield stress (MPa)
Ferrite	229	0.3	170
Cementite	177	0.26	-

域での正確なフェライトの挙動については今後の研究に待ちたい。

今回調査するのは、巨視的降伏状態までの材料の微視的挙動であるので、解析の間はセメントイトは弾性的にしか振る舞わないと仮定した。セメントイトについては極めて固いとの説や容易に塑性変形するという説¹²⁾などがあるが、本研究ではセメントイトは弾性体であると仮定した。値を Table 1 に示す。なお、第二相の存在が巨視的弾性常数に影響するということも報告されているが¹³⁾、本論文では、余りその点に焦点をあてることなく、単純にフェライトとセメントイトの弾性定数を仮定することで計算を行った。

3. 数値解析結果

3.1 初期引張

残留応力も残留ひずみも存在しない初期状態から出発して、Fig. 1のメッシュに単軸引張荷重をかけた際に得られた巨視的応力-ひずみ線図を Fig. 3 に示す。原点から A 点まではほぼ直線的に応力-ひずみ線図が立上がるが、A 点を超えるとその傾きは微妙に小さくなり、B 点に至って、目に見えて巨視的降伏現象が現れる様に見える。原点から A 点、A 点から B 点、B 点以降の応力-ひずみ線図の傾きの変化を Fig. 4 に示す。

この巨視的結果に対応して、微視的領域でどのような現象が起こっているかを Fig. 5 に示す。図中の白い部分は弾性状態にあることを示すが、原点から A 点までの荷重の間は、微視的領域はセメントイトもフェライトも弾性状態にあり、A 点に至って初めてフェライト中に局所的な降伏現象が現れることが判る。これに伴って、巨視的応力-ひずみ線図の傾きが僅かに変化し始める。しかしながら B 点に至

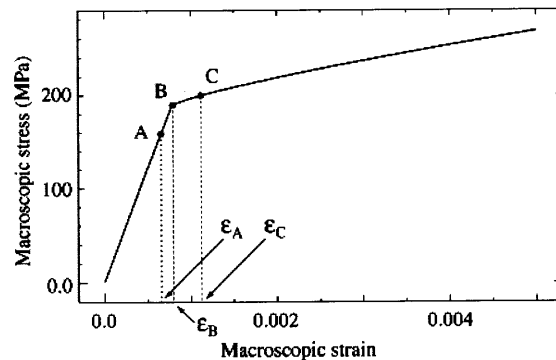


Fig. 3. Stress-strain curve on tension side obtained after analysis by homogenization method.

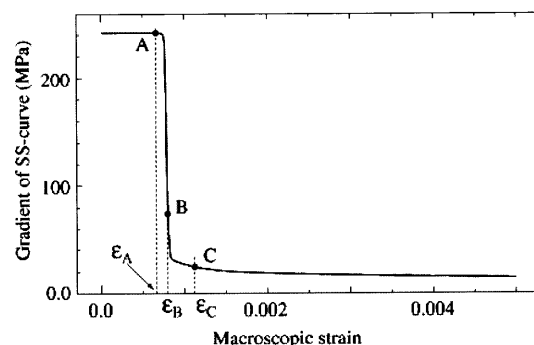


Fig. 4. Gradient of stress-strain curve of initial loading.

るまでは微視的領域内で降伏しているフェライトの面積は余り大きくはなく、セメントイトの間に局在化された形で少しずつ拡大して行くので、微視的領域の平均値が投影される巨視的領域を見れば、A-B間では、巨視的応力-ひずみ線図は弾性状態から余り懸け離れた挙動をしているのではなく、B点に至るまではあたかも原点-A点間の比例関係が続いている様に見えてしまう。B点に至って微視的領域の中で塑性変形した状態にあるフェライトの面積がある程度の大きさになり、それが荷重方向に対して直角な横断面で繋がった時に、巨視的にはB点が出現する、と言える。つまり微視的領域内を巨視的荷重方向を横切る形のある断面を想定して、その断面にあるフェライトが全て塑性状態に入った時がB点である。なお、C点は、巨視的に見れば、完全に降伏している状態であるが、微視的に見れば、部分的に降伏状態に入っていないフェライト領域が僅かに残っていることは興味深い。

3.2 除荷

Fig. 6に初期荷重の後、巨視的荷重ゼロまで除荷した場合の微視的領域の状態を示す。Fig. 6(a)と Fig. 6(b)は A 点直前まで荷重した後に除荷した場合、Fig. 6(c)と Fig. 6(d)は B 点直前まで荷重した後に除荷した場合である。どちらの場合も微視的降伏領域にある面積の拡大は見られない。筆者らの研究によれば、巨視的塑性ひずみのある程度与えた後に除荷すると、初期荷重の過程で微視的領域に現れた塑性変形部分が加工硬化しているために、この部分が他の

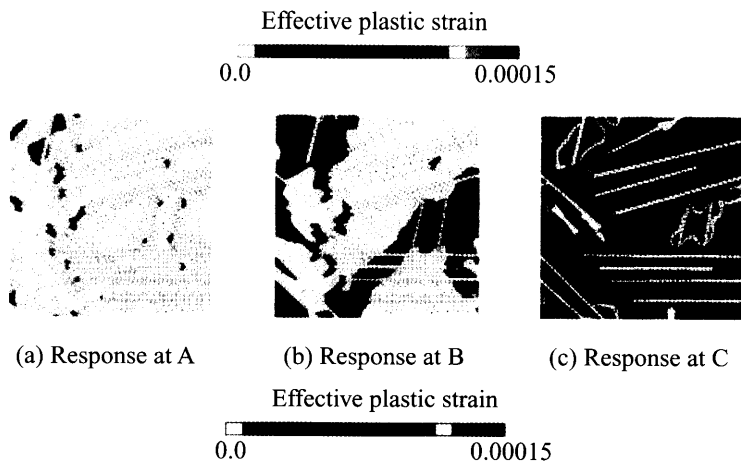


Fig. 5. Microscopic response of plastic deformation zone under macroscopic initial loading.

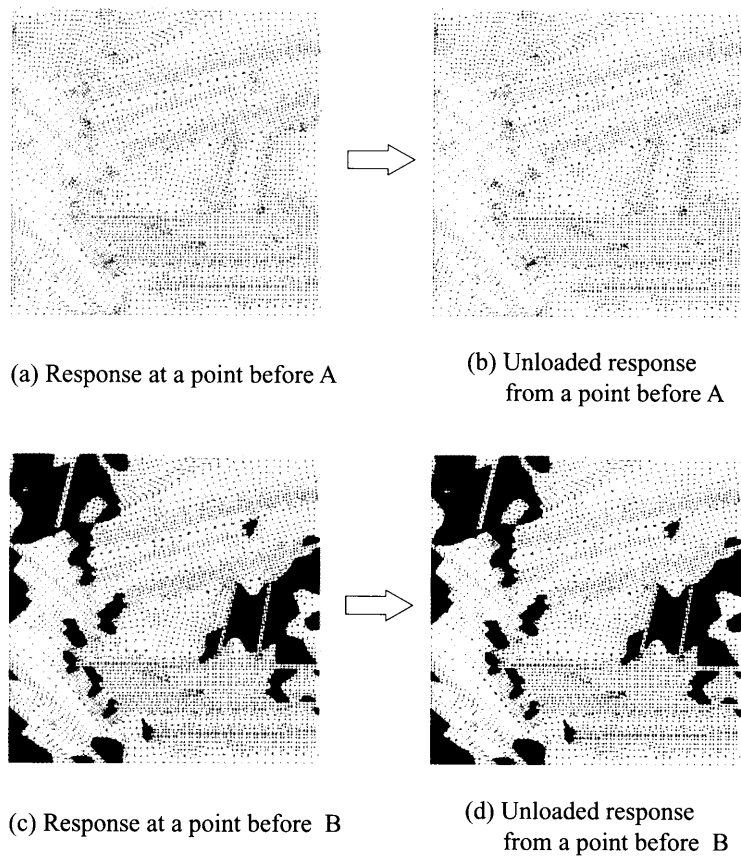


Fig. 6. Microscopic response of plastic deformation zone after microscopic unloading.

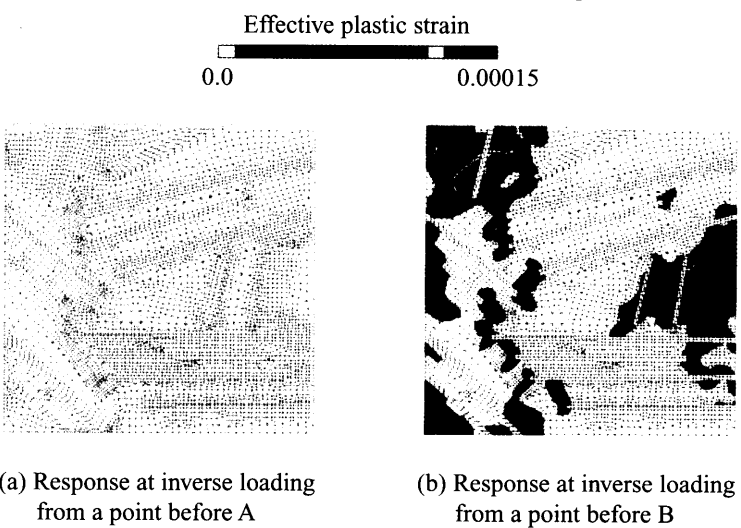


Fig. 7. Microscopic response of plastic deformation zone after inverse loading.

部分に対する拘束となって、初期負荷の時に降伏していなかった部分に新たな降伏が起こり、巨視的に見るとバウシinger効果が現れるという計算結果が示されている^{8,9)}。しかし、Fig. 6からは、初期負荷での巨視的塑性変形が余り大きくない場合は、除荷過程は微視的には弾性状態が保たれたまま進行することが判る。

なお、巨視的に完全除荷したFig. 6(b)とFig. 6(d)の状態から、除荷開始点までそれぞれ再負荷を試みたが、いずれの場合でも微視的領域では新たな塑性変形の進展は見られなかった。

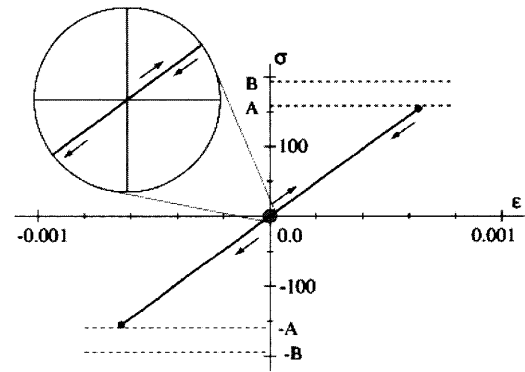
3・3 逆負荷

Fig. 6の除荷の後、巨視的圧縮方向に逆負荷を加えた場合の微視的領域の反応をFig. 7に示す。逆負荷の程度は、Fig. 6(b)とFig. 6(d)の除荷開始点での巨視的応力値の符号を反対にした値までとした。即ち、交番負荷をかけた。Fig. 7(a)に示す様に、除荷開始点の微視的状态が全面的に弾性状態であったA点直前からの除荷の場合は、交番負荷をかけても微視的領域の反応は弾性ままである。しかしながら、Fig. 7(b)に示すように、除荷開始点がA点とB点の間にある場合は微視的領域の反応には新たな塑性変形が観察される。つまり、初期負荷での巨視的状态は一見弾性状態に見えるが微視的領域では実は塑性変形が起こっている状態を除荷開始点とした場合は、交番負荷による逆負荷を与えることにより、除荷過程では現れなかった新たな塑性変形が微視的領域に出現することが判る。

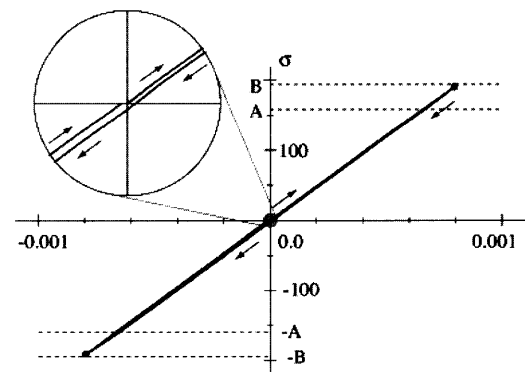
以上の結果を纏めると、除荷開始点の状態によって、除荷過程と逆負荷過程の巨視的応力-ひずみ線図がFig. 8の様に微妙に異なることが判る。

4. 実験

以上の結果の傍証を得るために、実験を行った。完全なパーライト組織である炭素含有率が0.8質量%である炭素鋼を用い、疲労試験機を用いて試験片に負荷をかけ、試験片温度を観察した。疲労試験時の温度観察による微視的損傷推定については報告があり¹⁰⁾、巨視的弾性範囲での交番負荷であっても、微視的領域での塑性変形があればジュール熱が発生すると言われている。本論文では片振り荷重と交番荷重を負荷した場合についての温度上昇を比較観察した。上記の解析結果が定性的に正しいとすれば、Fig. 3に示す巨視的応力-ひずみ線図上のA点以下の応力で試験をしても、片振り負荷であれ交番負荷であれ、微視的領域の塑性変形は進展しないので、試験片温度は上昇しないはずである。また、A点とB点の間での負荷で試験をした場合、片振り負荷では温度上昇は無いが、交番負荷では温度上昇があるはずである。素材の巨視的応力-ひずみ線図をFig. 9に示す。この結果から、巨視的降伏応力を390 MPaと読み取った。A点、B点は応力-ひずみ線図から直には判読



(a) Response from a point before A



(b) Response from a point before B

Fig. 8. Influence of initial loading point on macroscopic response of unloading and inverse loading.

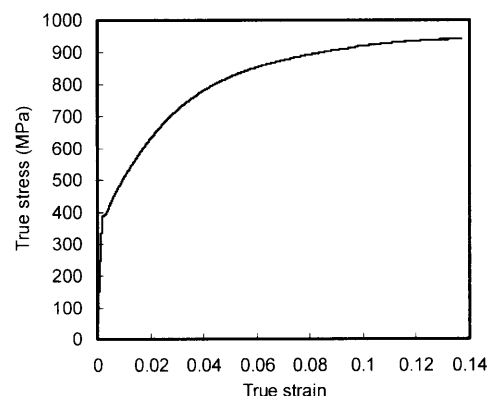


Fig. 9. Stress-strain curve of 0.8% plain carbon steel with pearlite structure.

できないので、この巨視的降伏応力以下の応力レベルで1秒間に6サイクルの片振り負荷、交番負荷をかけ、試験片平行部中央の温度の推移を、試験開始から100秒間サーモビューアーで観察した。試験片形状と試験条件をTable 2に示す。片振り負荷の場合は温度上昇は無かったが、100秒後の試験片温度をFig. 10に示すとおり、交番負荷の場合は、ある応力以上で応力レベルに応じた温度上昇が見られる。以上の結果は、数値計算で定性的に示したA点以上B点以下の交番負荷下のミクロ領域の塑性ひずみの伝搬が現実問題として存在する可能性を示唆している。

Table 2. Conditions of cyclic loading test and specimen geometry.

Yield Stress	Stress Amplitude (MPa)					
	240	260	280	340	380	420

(Unit : mm)

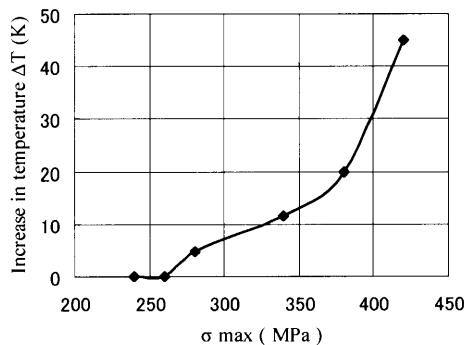


Fig. 10. Influences of peak stress and pattern of cyclic loading on increase in temperature.

5. 考察

本研究で行った均質化法と有限要素法解析の前提として、パーライト組織中のフェライトの機械的性質は、フェライト単相の巨視的試験片を用いて採取した応力-ひずみ線図に従うという仮定を置いている。また、セメンタイトは解析を通じて弾性状態を保つという仮定も置いている。更に、セメンタイトとフェライトの界面には相互滑りは無いという仮定も置いている。これらの仮定の是非に関して議論はあるであろうが、これらが実態としてどの様であるのか、実物の測定値が不足している現在、大胆な仮定を置いて解析を先行させ、微視的領域の中で起こっている現象を推測しようと試みたのが本研究である。その結果は、定性的には材料の挙動説明が出来ても、定量的には今一步のところもある。例えば、筆者らの従来の研究の過程で、パーライト組織やフェライト・パーライト組織の巨視的初期降伏挙動を定性的には説明できても、初期降伏応力はフェライト単相のそれよりも遙かに高いという実験事実を説明するためには、パーライト中のフェライトは多結晶体のフェライト単相の応力-ひずみ線図上の2倍程度の応力値を有する応力-ひずみ線図に従わなければ、計算結果は実験結果に合致しない、という問題提起をしている¹⁴⁾。この辺りの乖離を埋めるためにも、今後、微視的領域の物理的性質の測定が待たれる。

また、今回の対象はBCC金属であったが、FCCの多結晶体を対象とした場合にも均質化法と有限要素法の解析は適用可能であることを、筆者らは示している¹⁵⁾。更に、将

来的には結晶の異方性をも解析の中に取込むことも必要であろうが、その前に、微視的領域で、フェライトならフェライトが連続体的な挙動をするとして、どの程度の機械的異方性が観察される様に振る舞うのか、具体的なデータを採用して、これをモデル化する必要があると考えている。その様にすることで、解析精度の質も向上する。今後の測定技術の進展に期待したい。

6. 結言

フェライトとセメンタイトが混在するパーライト組織に焦点を当てて、弾塑性有限要素法と均質化法による数値計算を行い、微視的領域での降伏現象と巨視的領域での降伏現象の相互作用を論じた。モデルは2次元であり、また、微視的領域のフェライトの応力-ひずみ線図や、微視的領域でのセメンタイトの機械的性質の正確な測定値、あるいはフェライトとセメンタイトの界面の拘束条件等、精密な測定値が現状では見あたらない部分に、大胆な仮定を置いて単純なモデルで解析を進めたが、巨視的には弾性で見られる場合でも、微視的領域では塑性変形が進行していることがあり、また巨視的には塑性状態であっても、微視的領域には弾性状態のフェライトが残っている可能性があることが示唆された。また、引張初期負荷を巨視的弾性状態と見える範囲で与えた場合には、除荷過程では微視的領域では新たな降伏現象は発生しないが、巨視的には弾性状態と見ることが出来るが微視的領域で塑性変形が発生している状態を初期負荷として、そこを基準に交番負荷を与えた場合に新たな微視的降伏が起こる可能性があることを示唆する結果を得た。この結果の傍証を、疲労試験機を用いて片振り負荷と交番負荷を与えた試験片の温度を測定することで得た。

文 献

- 1) R.Hill: The Mathematical Theory of Plasticity, Clarendon Press, Oxford, (1950).
- 2) 益田森治, 室田忠雄: 工業塑性力学, 養賢堂, 東京, (1971).
- 3) JISハンドブック鉄鋼, 日本規格協会, (1990), 131.
- 4) K.Higashida and R.Morikawa: *CAMP-ISIJ*, **18** (2005), 446.
- 5) 秋山雅義: 計算工学, **6** (2001), 8.
- 6) 寺田賢二郎, 菊池 昇: 均質化法入門, 計算力学学講座シリーズ①, 日本計算工学会編, 丸善, 東京, (2003).
- 7) J.Bauschinger: *Mtt. Mech.-Tech. Lab. K. Tech. Hochschule Muenchen*, (1886).
- 8) 松井和巳, 寺田賢二郎, 秋山雅義, 久保木孝, 及川兼司: 日本機械学会論文集A編, **68** (2002), 1559.
- 9) K.Terada, K.Matsui, M.Akiyama, T.Kuboki: *Comp. Mater. Sci.*, **31** (2004), 67.
- 10) M.P.Luong: *Mech. Mater.*, **28** (1988), 155.
- 11) A.Taniyama, T.Takayama, M.Arai and T.Hamada: *Scr. Mater.*, **51** (2004), 53.
- 12) M.Umemoto and K.Tsuchiya: *Tetsu-to-Hagané*, **88** (2002), 117.
- 13) JSME: The Modulus of Elasticity of Metals and Alloys, (1980), 31.
- 14) 松井和巳, 寺田賢二郎, 秋山雅義, 久保木孝, 日下桂一, 及川兼司: 応用力学論文集, 土木学会, **5** (2002), 175.
- 15) K.Terada, I.Watanabe and M.Akiyama: *CAMP-ISIJ*, **17** (2004), 404.