パーライト鋼中における 応力分配の堆積転位内部応力による理解

定松 直*・東田 賢二*²

Understanding of Stress Redistribution Due to the Internal Stress of Dislocation Pile-Up in Pearlite Steel

Sunao SADAMATSU and Kenji HIGASHIDA

Key words: pearlite; stress redistribution; phase stress; internal stress; pile-up dislocations.

1. 緒言

パーライト鋼の変形初期段階の大きな加工硬化能には、フェライトとセメンタイトの塑性歪み差に起因する内部応力分配が重要な役割を果たしている。このことは、Tomotaniらによる中性子回折を用いた引張変形下でのフェライト、セメンタイトの格子面間隔測定に基づく弾性歪みのその場測定により実験的に示された^{1,2)}。Fig.1はその様子を模式的に示すものである。ここで降伏後、引張外力の増加に対して、フェライト相の負担応力は殆ど変化しないのに対して、セメンタイトの応力は急激に大きくなる。すなわち、降伏後、フェライト側には圧縮、セメンタイト側には引張の内部応力が発生し、この応力のやりとり（応力分配）により著しい加工硬化が起こる。これについてはマイクロメカニクス³⁻⁵⁾に基づいた明快な議論が展開されているが、一方、それが塑性変形現象である以上、転位によってもそ

の現象は理解されるはずである。本稿では、このような応力分配を、フェライト-セメンタイト界面に堆積した転位群の内部応力場によるものとして捉え、それを通してパーライト中の各相に作用する応力（相応力）の変化を考える。

2. 方法と結果

パーライト組織のモデルとして、Fig.2に示すように、引張軸方向に平行で厚さの異なるセメンタイト層 θ とフェライト層 α とが、周期的に配列した層状組織を想定する。すべり面は引張軸に対して45°傾き、転位源はフェライト中心部（Fig.2中の黒点）にあるとする。矢印のように引張外力が加わると弾性変形後まず、軟質なフェライトのみが降伏し、フェライト-セメンタイト界面に転位が幾層にもわたって堆積した状況を考える。発生する転位はすべて

Fig. 1. Illustration of phase stress estimated by neutron diffraction.

Fig. 2. Illustration of dislocation pile-ups in ferrite-cementite lamella structure.

平成24年2月16日受付 平成24年3月26日受理 (Received on Feb. 16, 2012; Accepted on Mar. 26, 2012)

* 九州大学大学院生 (Graduate Student, Kyushu University, 744 Motooka Nishi-ku Fukuoka 819-0395)

*² 九州大学大学院工学研究院 (Department of Materials Science and Engineering, Kyushu University)

刃状転位とする。界面に堆積した転位群の分布は、単層で single-ended pile-up したときの平衡転位分布⁶⁾に従うものとした。1つの堆積転位群の中に n 本の転位が含まれ、その分布を連続転位密度関数 $D(x)$ で表すとする、式 (1) が成り立つ。

$$\int_0^L D(x) dx = nb \quad (1)$$

ここで b はバーガースベクトルの大きさ、 L は転位堆積距離である。剪断外力 τ のもとで、この堆積転位群が平衡状態、すなわち個々の転位に作用する力がバランスしてゼロとなるときの、分布関数 $D(x)$ は式 (2) のように表される。

$$D(x) = \frac{2nb}{\pi L} \left(\frac{L-x}{x} \right)^{1/2} \quad (0 < x < L)$$

$$D(x) = 0 \quad (x \leq 0, L \leq x) \quad (2)$$

ここで転位堆積距離 L は式 (3) で表される。

$$L = \frac{n\mu b}{(1-\nu)\pi\tau} \quad (3)$$

上式中の μ は剛性率、 ν はポアソン比である。

ここで、転位堆積距離 L は、常に転位源から異相界面までの距離であると考え、1層のフェライト相を斜め 45° に横切るすべり面距離の $1/2$ に固定した。すなわち、式 (3) において、転位堆積距離 L がフェライトラメラの厚さにより決まる定数となるため、堆積転位数 n を徐々に増やしたとき、力学的に平衡するために必要な剪断外力 τ の増加が一義的に決定される。

Fig.2 では転位源から放出され左右に堆積した1組の刃状転位群を、縦 (引張軸) 方向に7組、横方向に9組積層した。この基本構造を一定とした上で、個々の堆積転位群に

含まれる転位数を 3, 6, 10, 16 と変化させて、平衡分布に必要な外力 σ^A (式 (3) で求めた τ をシュミット因子 0.5 で除した値) を求めた。そして式 (2) の分布関数から堆積転位群による内部応力 σ^i (引張軸に垂直な面の法線応力成分) の分布を計算した。また σ^A と σ^i とを足し合わせ各相に作用する相応力 σ^P (phase stress) を求めた。用いたパラメータは以下の通りである。バーガースベクトルの大きさ $b = 0.248 \text{ nm}$ 、フェライト相幅 $= 0.4 \mu\text{m}$ 、セメンタイト相幅 $= 0.2 \mu\text{m}$ 、堆積転位距離 $L = 0.283 \mu\text{m}$ 、すべり面間隔 $= 0.283 \mu\text{m}$ 。フェライトとセメンタイトの弾性定数は同一とし、剛性率 $\mu = 80 \text{ GPa}$ 、ポアソン比 $\nu = 0.3$ とした。

まず堆積転位数が 3, 6, 10, 16 の時、それらの転位分布を平衡させるために必要な外力 σ^A (applied stress) は、それぞれ 191.4, 382.8, 637.9, 1020.0 (単位: MPa) となった。次に堆積転位数が 3 と 16 の場合についての内部応力 σ^i の分布をそれぞれ Fig.3 (a) (b) に示す。この図では外力 σ^A は加えておらず転位群の内部応力 σ^i の分布のみを示している。堆積転位数の増加に伴う内部応力増加が分かる。とくに図 (b) では、セメンタイトに引張 (黄色)、フェライトに圧縮 (青色) が明確に現れている。すなわち堆積転位前方のセメンタイトに引張内部応力集中が、その一方でフェライトに圧縮内部応力が発生している。この内部応力を先に計算した外部応力と重ね合わせて、各相中で平均値を求めることで各相の相応力 σ^P を求めた。

Table 1 に堆積転位数とその平衡転位分布に必要な引張外力 σ^A 、そしてフェライト、セメンタイト各相の相応力 σ^P を示す。Fig.4 にこれを図式化した。図中横軸は引張外力 σ^A 、縦軸はフェライト、セメンタイト各相にかかる相応力 σ^P である。図中、外力 σ^A (横軸値=縦軸値) のレベルを破線で示している。堆積転位の内部応力を通じて、フェライトとセメンタイトとの間で応力分配の生じていることが理解される。また、その内部応力の大きさのオーダーは中性子線回折より得られている結果¹⁾ (セメンタイトにおいて数百 MPa から数 GPa、フェライトにおいて数百 MPa) と

Fig. 3. Internal stress distributions due to pile-up dislocations in ferrite-cementite lamella structure: (a) dislocation number in pile-up $n=3$, (b) $n=16$.

Table 1. Applied stress and phase stress in ferrite and cementite.

Applied stress (MPa)	The number of dislocations	Phase stress in ferrite (MPa)	Phase stress in cementite (MPa)
191.4	3	114.4	356.4
382.8	6	213.8	720.8
637.9	10	360.9	1209.9
1020.0	16	588.0	1945.0

Fig. 4. Phase stresses in ferrite and cementite calculated based on dislocation pile-up.

一致している。

なお、フェライト、セメンタイト両相の体積率より複合則を用いて計算した応力値は、外力と一致せねばならないが、Table 1の計算結果では、約1%の誤差を生じている。これはFig.2で示す転位群の外側に内部応力が減衰しながらも存在するが、平均値を計算した領域には、それが含まれていないためである。

3. 結言

パーライト鋼の変形初期の高い加工硬化能を理解する上で、フェライト、セメンタイトの間で生ずる応力分配が重要であることは、先に述べた中性子回折の実験結果やマイクロメカニクスに基づく理論解析で明らかである。このことは塑性変形するフェライト相の転位密度上昇を単純にBailey-Hirschの関係に入れて変形抵抗の増加を計算しただけでは、この材料の加工硬化を理解出来ないことを意味している。本稿では、フェライトーセメンタイト界面への転位堆積を想定し、その内部応力を計算することで、応力分配に対応した状況を記述出来る可能性を示した。それは初等転位論に基づき、簡素化のため多くの仮定を含むが、その一方で転位による長範囲応力場の加工硬化に果たす役割の重要性を示唆しているとも考える。今後これらの議論を発展させるためには、フェライトーセメンタイト界面での転位の挙動や、それに伴う応力場の変化、さらにセメンタイト自身の塑性変形の可能性についても議論すべきであり、転位論はそのような問題においてよりその力を発揮するのではないと思われる。

最後に本稿に関連して貴重なご意見を頂いた尾中晋、大橋鉄也、下川智嗣、各先生方に感謝する。また、本研究は、(独) 科学技術振興機構 (JST) による産学共創基礎基盤研究プログラム「革新的構造用金属材料創製を目指したヘテロ構造制御に基づく新指導原理の構築」の支援を受けて行われたものである。

文 献

- 1) Y.Tomota, P.Lukas, D.Neov, S.Harjo and Y.R.Abe: *Acta Mater.*, **51**(2003), 805.
- 2) Y.Tomota: *Bull. Iron Steel Inst. Jpn.*, **9**(2004), No.8, 14.
- 3) 村外志夫, 森勉著: マイクロメカニクス 転位と介在物, 培風館, 東京, (1976), 149.
- 4) T.Mura: *Micromechanics of defects in solid*, Springer, Berlin, (1987), 398.
- 5) S.Onaka and M.Kato: *Mat. Trans., JIM*, **40**(1999), 1102.
- 6) J.Weertman and J.R.Weertman 著, 中村正久訳: 基礎転位論, 丸善, 東京, (1968), 123.