



フェライト-ベイナイト鋼の変形挙動に及ぼす組織形態の影響

石川 信行*・末吉 仁*・遠藤 茂*・鹿内 伸夫*

Effect of Microstructure on Deformation Behavior of Ferrite-Bainite Steels

Nobuyuki ISHIKAWA, Hitoshi SUEYOSHI, Shigeru ENDO and Nobuo SHIKANAI

Synopsis : Effect of bainite volume fraction on tensile properties of ferrite-bainite steels was investigated experimentally and analytically. Ferrite-bainite steels with different bainite volume fractions having the similar mechanical properties for each constituent phase were prepared and the tensile properties were investigated. Lower yield ratio (YR) and higher n-value were obtained for the steels with bainite volume fraction of 16 to 35%, while the ferrite or bainite single phase steels exhibited relatively higher YR and lower n-value. In order to investigate microscopic deformation behavior of ferrite-bainite steels, an axisymmetric unit cell model based on a regular array of second-phase particles arranged on a BCC lattice was applied. Finite element analyses were carried out to investigate the macroscopic and microscopic response of unit cells with morphological features based on the actual steels. Macroscopic deformation behavior of ferrite-bainite steels calculated by the unit cell model showed good agreement with experimental results. In addition, the effect of bainite volume fraction on YR and n-value was well simulated by the unit cell model. Microscopic investigation on the unit cells revealed that significant strain concentration existed in the ferrite phase near the ferrite/bainite boundary for ferrite-16% and 35% bainite steel, which had higher experimental n-value. However, further increasing of bainite volume fraction caused plastic deformation of bainite phase and the strain concentration was decreased, resulting in lower level of n-value for ferrite-58% bainite steel. Effect of bainite morphology on strain hardening behavior of ferrite-bainite steels was also discussed based on analytical study using the unit cell model.

Key words: ferrite-bainite steel; plastic deformation; stress-strain curve; n-value; FEM analysis; unit cell model.

1. 緒言

組織制御技術は多くの構造用材料の開発において極めて重要な技術であり、近年の高強度低降伏比鋼¹⁻³⁾や高変形能ラインパイプ^{4,5)}等の開発においては、フェライト-ベイナイト等の二相組織とすることによって、低降伏比や高n値が実現されている。これらのような高性能鋼材の開発は近年のマイクロアロイング技術やTMCP技術の進歩によるところが大きく、その合金元素量や製造条件から鋼材のミクロ組織を精度良く予測する技術も発達している。しかしながら、最終的に得られたミクロ組織形態と機械的特性の関係が十分解明されているとはいえず、特に複相化された高強度鋼材等の多くの場合について、要求特性に対して鋼材の機械的特性を最適化するために多くの実験による合わせ込みが未だ不可欠となっている。

鋼の引張特性に対するミクロ組織の影響に関しては古くから数多くの実験的研究がなされているが、近年、ミクロ組織から応力-歪曲線を予測する手法が多く示されている。Tomotaら^{6,7)}はEshelby⁸⁾のInclusion理論とMori-Tanaka⁹⁾の平均場理論に基づいて、複相材料の引張特性を予測する連続体モデルを提案している。この連続体モデル

は各構成相の応力歪関係に基づいて複相材料の巨視的な応力歪関係を精度良く予測することが可能であり、鉄鋼材料に関しても数多く適用されている^{9,10)}。しかし、応力および歪値は各相内で平均化されるため、それぞれの構成相内部での微視的な応力歪状態に関する情報を得ることはできない。さらには、友田のモデルは主に球形第二相を含む材料に対して適用されているが、多くの高強度鋼材は制御圧延によって製造されており、圧延方向に伸展した組織が鋼材の機械的特性に大きく影響を及ぼしていることが予想される。そのため、二次元平面歪要素を用いたFEM解析^{11,12)}によって、複相組織鋼の微視的な応力歪状態や第二相粒子の形態の影響が調査されているが、第二相組織を含んだ鋼材の三次元的な微視的な変形挙動を正しくモデル化することの困難さから、多くの場合定性的な情報を得るにとどまっている。

ボイドを含んだ材料の変形挙動をFEMにより解析する手法として、Socrateら¹³⁾はBCC格子状に配列したVoronoi 14面体と等価な軸対称単位セルモデル (V-BCCモデル) を提案し、ボイド間マトリクスの局所剪断変形等の微視的な塑性変形挙動を正しく再現できることを示した。Ishikawaら¹⁴⁾はVoronoi型単位セルモデルをフェライト-

Table 1. Chemical compositions of the steels used.

No.	Microstructure	Chemical compositions (mass %)					Bainite volume fraction (%)	Bainite aspect ratio	Micro hardness (HV5g)	
		C	Si	Mn	Nb	V			Ferrite	Bainite
1	100%F	0.010	0.28	1.46	0.041	0.051	0.9	-	151	-
2	F+16%B	0.036	0.29	1.52	0.046	0.051	15.5	2.6	178	349
3	F+35%B	0.080	0.29	1.51	0.044	0.051	34.9	2.3	181	328
4	F+58%B	0.121	0.29	1.52	0.046	0.051	58.1	2.5	229	384
5	100%B	0.203	0.28	1.52	0.044	0.051	97.1	-	-	349

パーライト組織鋼の変形挙動解析に応用し、フェライト-パーライト組織鋼の変形挙動をそのマイクロ組織より精度よく予測できることを示した。

構造用鋼に対する様々な要求性能に対して迅速な材料開発を行うためには、材料特性に及ぼすマイクロ組織の影響を理解し、必要性能に応じてマイクロ組織を最適化することが必要となる。そのためには、材料特性に対する個々の組織因子の影響を明確にすると同時に、材料のマイクロ組織に依存した微視的な力学挙動と材料のマクロな力学的特性の関係を解明することが重要と考えられる。本論文では高変形能ラインパイプなどに利用されているフェライト-ベイナイト二相組織鋼を取り上げ、はじめに、引張特性、特に加工硬化特性に対するマイクロ組織の影響を各構成相の特性が等しくベイナイト分率のみ異なる鋼材を用いて調査した。そして、Voronoi型単位セルモデルによってフェライト-ベイナイト組織鋼の変形挙動を解析し、ベイナイト分率の変化による引張特性の変化を各構成相内の微視的な変形挙動から考察する。さらに、高い加工硬化特性が得られるマイクロ組織形態に関して解析的な検討を行なう。

2. フェライト-ベイナイト鋼の引張特性に及ぼすベイナイト分率の影響

2.1 実験方法

ベイナイト分率のみが異なり、各構成相の特性が等しいフェライト-ベイナイト組織鋼を得るために、Table 1に示した成分の鋼を50 kg真空溶解により溶製し、熱間圧延-加速冷却により板厚15 mmの鋼板を製造した。ここで、熱間圧延はオーステナイト温度域(900°C以上)で終了し、いずれの鋼も720°Cから加速冷却を行った。供試鋼はC量のみが異なり、Fig. 1に模式的に示すように、加速冷却開始温度では、鋼No. 1はフェライト(α)単相、鋼No. 5はオーステナイト(γ)単相、そして鋼No. 2~4は $\alpha+\gamma$ 二相域となるようにC量を調整した。このとき鋼No. 2~4の α および γ 中のC量はそれぞれ図中の1および5となり、C量に応じて相分率のみが異なる。そして、加速冷却後に得られる組織はフェライトとオーステナイトから変態したベイナイトの二相でその相分率のみが異なるマイクロ組織となる。

得られた鋼は光学顕微鏡により圧延方向に平行な板厚方

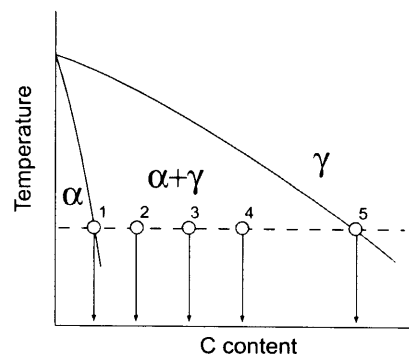


Fig. 1. Schematic illustration for ferrite-austenite equilibrium in the Fe-C partial phase diagram.

向断面の板厚中央部のマイクロ組織を観察し、画像解析によりフェライトとベイナイトの面積分率を測定した。また、ベイナイト相(複数のベイナイト粒からなるそれぞれ孤立したベイナイト相領域)については、圧延方向の長さ(a)と圧延垂直方向の長さ(b)との比をアスペクト比(a/b)として求めた。さらに、各構成相の強度を比較するために、荷重5 gの超マイクロビッカース硬度計によりフェライト相およびベイナイト相の硬度を測定した。硬さはそれぞれの相について60点の平均値とした。供試鋼の引張特性は板厚中央部の圧延方向と平行な方向で採取した、平行部径6 mm、標点間距離30 mmの丸棒引張試験片により測定した。

2.2 ミクロ組織

供試鋼のマイクロ組織をFig. 2に示す。鋼No. 1はわずかにベイナイトの生成が見られるがほぼフェライト単相の組織であり、鋼No. 5もほぼベイナイト単相のマイクロ組織が得られている。鋼2~4はいずれもフェライト-ベイナイト二相組織となっており、相分率が異なっている。ベイナイト面積分率およびベイナイト相のアスペクト比をTable 1に示した。C量の増加に伴ってベイナイト面積分率が増加している。また、同じ条件で熱間圧延を行っているため、フェライト相の平均結晶粒径はいずれの鋼も10~20 μm で同程度である。

フェライト相およびベイナイト相の硬さ測定結果もあわせてTable 1に示した。F+58%B鋼はフェライト相、ベイナイト相のいずれも他に比べ高い値を示しているが、それ以外の供試鋼はフェライト相及びベイナイト相が同等の硬さとなっており、目標とした、フェライトとベイナイトの

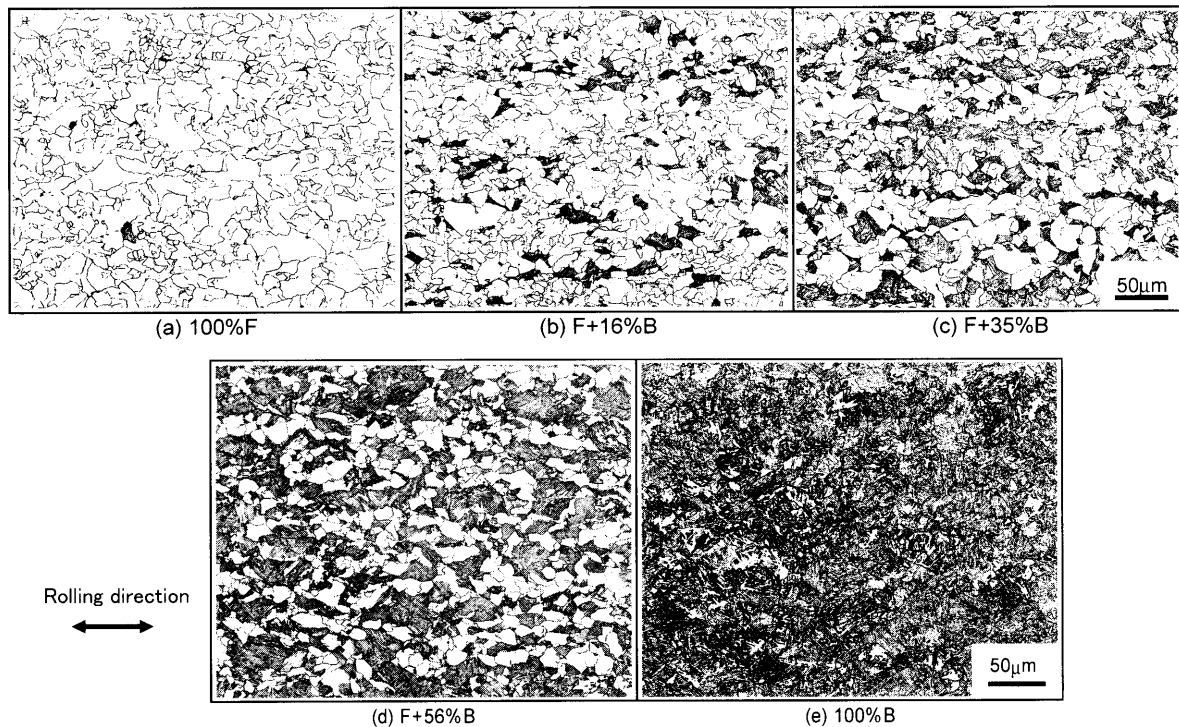


Fig. 2. Microstructure of the steels used.

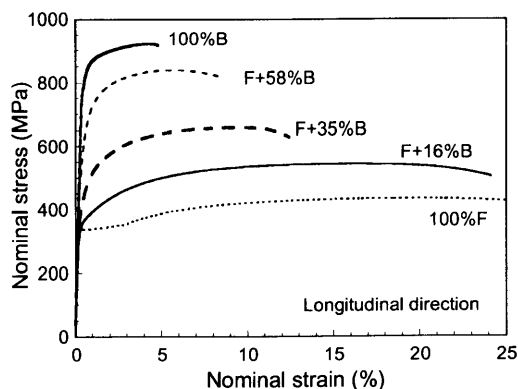


Fig. 3. Stress-strain curves of ferrite-bainite steels.

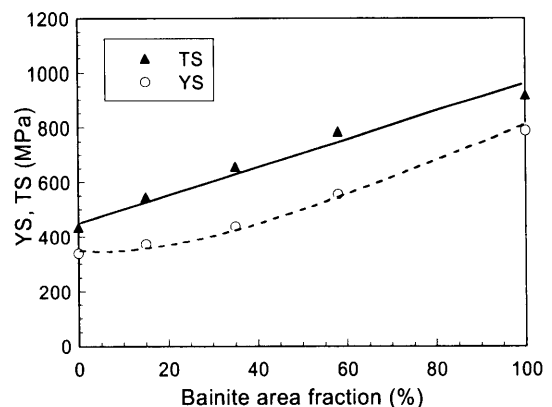


Fig. 4. Effect of bainite area fraction on yield and tensile strength of ferrite-bainite steels.

特性が等しく、相分率のみが異なるフェライト-ベイナイト組織鋼が得られた。

2・3 引張特性とベイナイト分率の関係

供試鋼の引張試験により得られた応力歪曲線を Fig. 3 に示す。100% F 鋼は降伏伸びを有する応力歪曲線を示しているが、その他の鋼はいずれも降伏伸びの無い連続降伏型の応力歪曲線となっている。また、ベイナイト分率が高くなるほど、強度が上昇し伸びが低下している。引張強度 (TS) 及び降伏強度 (YS) の測定結果とベイナイト面積分率の関係を Fig. 4 に示す。引張強度はベイナイト面積分率の増加に伴って直線的に上昇しており、従来知見と同様にフェライト-ベイナイト二相鋼の引張強度は軟質相と硬質相の強度の混合則によって与えられると言える。一方、降伏強度についてはベイナイト面積分率が35%までは増加量が小さく、それ以降は引張強度と同様の増加率になって

いる。

降伏比 ($YR = YS/TS$) 及び n 値とベイナイト面積分率の関係を Fig. 5 に示す。 n 値は次式によって定義される。

$$\sigma = A\epsilon^n \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 σ 、 ϵ および A はそれぞれ、真応力、真歪および材料定数、 n は n 値である。一般的には、応力歪曲線全体を (1) 式で近似して n 値を求める場合が多いが、ここでは耐座屈性能に影響を及ぼす範囲として、1~4%の歪範囲で n 値を求めた。F+35%B 鋼で降伏比が最小となり、フェライト単相またはベイナイト単相組織では高くなっている。一方、 n 値は逆に、ベイナイト体積率が16~35%で高い値を示している。

軟質相と硬質相の混合組織とすることにより、それぞれ

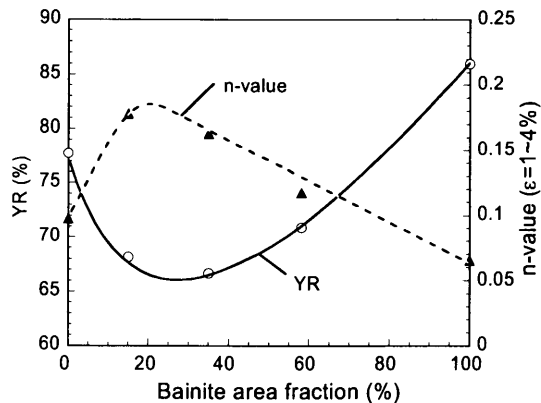


Fig. 5. Effect of bainite area fraction on yield ratio and n-value determined in the strain range from 1 to 4%.

の単一組織の場合より降伏比が低下することはShikanaiら¹⁵⁾の解析的検討によって示されている。Shikanaiらは平面歪FEMを用いており、第二相分率が50%で降伏比が最低値をとるとしているが、今回の実験結果と傾向は一致している。これは、Fig. 4に示されたように、引張強度はベイナイト面積分率に比例して上昇するのに対して、降伏応力はベイナイト面積分率が低いときはその上昇量が小さく、ほぼ軟質相の降伏強度によって2相組織鋼の降伏強度が決まるためである。また、硬質相の面積分率が高くなると、硬質相によって軟質相の変形が拘束されるため降伏応力が上昇してくると思われる。

一方、n値に対する第二相分率の影響に関しては、Huperら¹¹⁾がTomotaら^{6,7)}と同様のMicromechanicsの手法を用いた検討を行っている。Huperらの解析の結果では、第二相の面積分率の増加に伴ってn値も単調に増加しており、Micromechanicsの手法では、n値がある第二相分率で極大値をとる現象を再現できていない。

以上のように、引張特性に及ぼすベイナイト体積率の影響が実験的に明らかにされたが、従来の手法では複相組織鋼の変形挙動の予測は十分とはいえない。そこで、次章においては単位セルモデルによる解析を行い、その適用性について検討するとともに、微視的な変形挙動の解析を行う。

3. Voronoi型単位セルモデルによるフェライト-ベイナイト鋼の変形挙動解析

3.1 Voronoi型単位セルモデル

Socrateら¹³⁾は広範囲な組織形態を有する材料の微視的な力学挙動を解析するために、次に示すVoronoi型単位セルモデル(V-BCC model)を提案した。第二相粒子はFig. 6(a)に示すように、BCC格子状に配置されており、中心に第二相粒子を内包するVoronoi 14面体によって空間を隙間無く埋め尽くすことが可能である。そして、周期性と対称性から、Voronoiセルの上半分(または下半分)のみを使

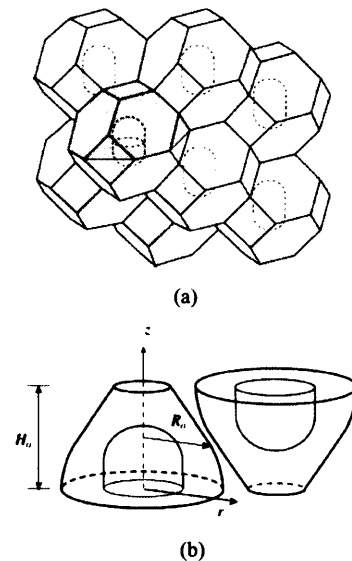


Fig. 6. The V-BCC model: (a) three dimensional array of Voronoi tessellation of the BCC lattice, (b) two adjacent axisymmetric Voronoi cells.

えばよいことになり、Fig. 6(b)に示すように軸対称モデルで近似することができる。ここでは、初期セルの高さを $H_0=1.0$ とする。セルが軸方向の負荷を受けた場合、隣り合うセルの変形を考慮すると、以下の境界条件が満たされなければならない。

$$[R_0(\xi) + U_r(\xi)]^2 + [R_0(1-\xi) + U_r(1-\xi)]^2 = 2[R_0|_{0.5} + U_r|_{0.5}]^2 \quad (2)$$

$$U_z(\xi) + U_z(1-\xi) = 2U_z|_{0.5} \quad (3)$$

ここで、 $R_0(\xi)$ は、 $z=\xi$ の位置のセル境界半径、 $U_r(\xi)$ および $U_z(\xi)$ は、それぞれその初期座標が $z=\xi$ の位置のセル境界上の点の径方向変位及び軸方向変位である。この非線形の境界条件がVoronoi型単位セルモデルの重要な特徴の一つである。これによってマトリクスの塑性流動が容易となり実際の微視的変形挙動を再現できると考えられている。このモデルの詳しい説明は、Socrateら¹³⁾またはIshikawaら¹⁴⁾の文献を参考にされたい。

3.2 FEM解析方法

Table 1に示した組織分率の異なる3種類のフェライト-ベイナイト鋼(F+16%B, F+35%B, F+58%B)の微視的または巨視的挙動をFEMによって解析した。解析プログラムはABAQUS ver. 6.4 (Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc.)を使用し、8接点軸対称要素を用いて前述のVoronoi型単位セルモデルを構築した。メッシュ分割の例をFig. 7に示す。内部のハッチングした部分がベイナイト相であり、その周りがフェライト相のマトリクスとなっている。これらのメッシュ形状は供試鋼のベイナイト分率、ベイナイトアスペクト比(Table 1)に従って決めた。

材料のPoisson比は0.3、ヤング率を206 GPaとし、フェ

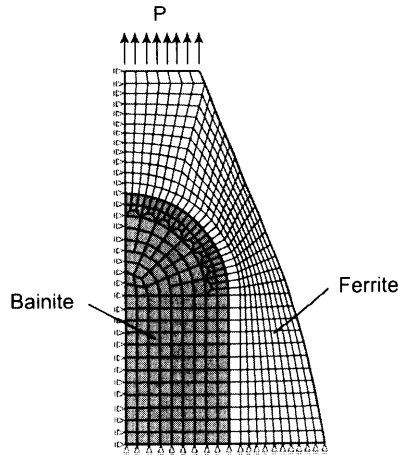


Fig. 7. Finite element mesh for F+35%B steel.

ライト相およびベイナイト相の応力歪関係はFig. 3に示した実験で得られた100% F鋼及び100% B鋼の応力曲線を用いた。ただし、フェライト相の応力歪関係は、100% F鋼と他のフェライト-ベイナイト組織鋼のフェライト相の硬さが異なっているため、硬さの比に応じた係数を応力値に乗じた応力歪曲線を用いた。そして、Voronoi型単位セルモデルの最大の特徴である(2)式の非線形境界条件はABAQUSプログラムのユーザーサブルーチン“Multi Point Constraint (MPC)”によって与えた。

3.3 巨視的変形挙動の解析結果

Fig. 8に上述のFEM解析で得られた応力歪曲線を実験結果とあわせて示す。なお、100% F鋼および100% B鋼についてはFEM解析を行っていないが、実験で得られた応力ひずみ曲線を用いれば実験と同じ結果が得られると考えられるので、Fig. 9には実験結果を示した。いずれのフェライト-ベイナイト鋼も実験結果とFEM解析結果とで比較的良好の一致を示している。FEM解析で得られた応力歪関係から求めたYR及びn値とベイナイト体積率の関係をFig. 9に示す。YRの値は実験値よりも若干高めの値となっているが、ベイナイト体積率35%で極小値を示しており、組織分率の影響は実験結果とよく対応している。また、n値の解析結果では極大値を示すベイナイト体積率が異なるものの、n値の値があるベイナイト体積率で極大値をとる傾向はよく一致している。

以上のように、Voronoi型単位セルモデルを用いることでフェライト-ベイナイト2相組織鋼の変形挙動をよく再現することが可能である。この単位セルモデルは複相組織鋼の巨視的変形挙動を解析できるだけでなく、組織内部での微視的な応力歪状態を解析することも可能である。次節では、単位セルモデルによりさらに詳細な解析を行い、組織内部の微視的変形挙動と、複相化による加工硬化特性の変化との関連性について考察を行う。

3.4 組織内部の微視的変形挙動

Fig.10にF+16%B, F+35%BおよびF+58%B鋼について、

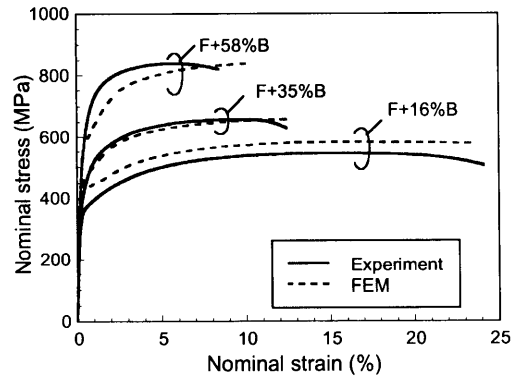


Fig. 8. Comparison of stress-strain curves by experiment and FEM analysis for ferrite-bainite steels.

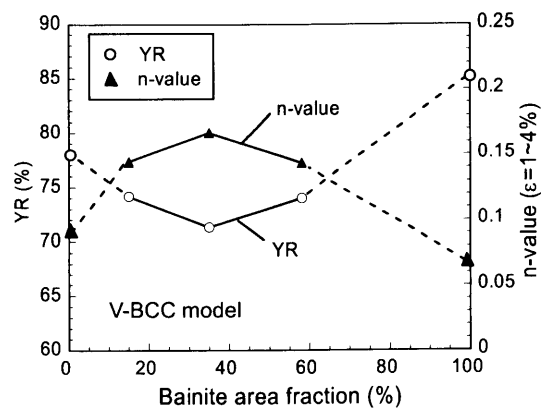


Fig. 9. Effect of bainite area fraction on yield ratio and n-value obtained by FEM analysis.

セル全体の平均歪が4%の時の相当塑性歪分布を示す。いずれもフェライト-ベイナイト界面で大きな歪集中を生じており、フェライト相内部へ塑性化領域が広がっている。また、F+16%B鋼とF+35%B鋼は平均歪4%ではベイナイト相は塑性変形を生じていない、すなわちフェライト相の変形のみによってセルの変形を吸収しているが、F+58%B鋼ではベイナイト相も塑性変形を生じている。フェライト相中で最も歪集中を生じている部分はいずれも同様の位置であるが、最高歪部分を横断する領域での相当塑性歪分布をFig.11に示す。平均歪が0.6%と4%の場合の歪分布を示した。また、Fig.11の横軸はFig. 6で $z=H_0/2$ でのセルの半径 R_0 で標準化した長さである。平均歪0.6%では歪集中部の最大歪はF+35%B鋼が最も高くF+16%B鋼が最も低くなっているが、F+58%B鋼はフェライト中での歪勾配が低い。また、平均歪4%でもF+35%B鋼が最も歪集中部の歪量が多い。そして、F+58%B鋼はベイナイトで塑性変形を生じており、歪集中部の最大歪が最も低く、さらにフェライト中での歪勾配も小さい。

以上のように組織内部での微視的な変形挙動はマイクロ組織形態の影響を大きく受け、それによって巨視的な力学特性が変化すると考えられる。ベイナイト面積分率の異なる上記3つのフェライト-ベイナイト鋼のn値は、実験では

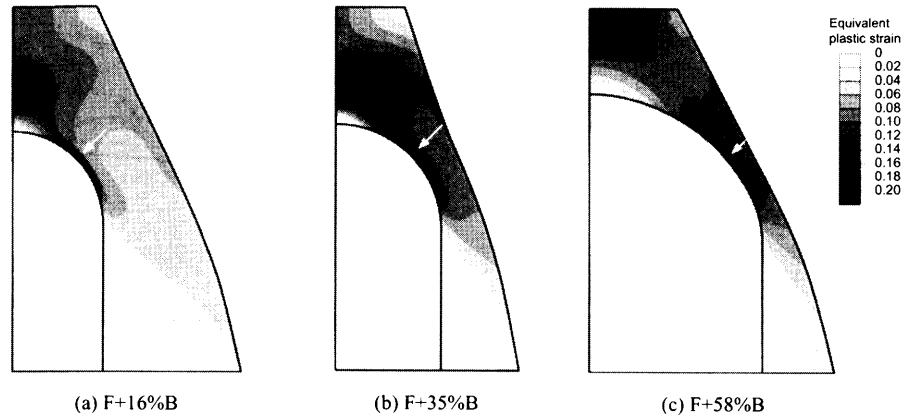


Fig. 10. Contour plots of equivalent plastic strain for ferrite-bainite steels calculated by unit cell model at nominal strain of 4%. White arrows indicate maximum plastic strain points.

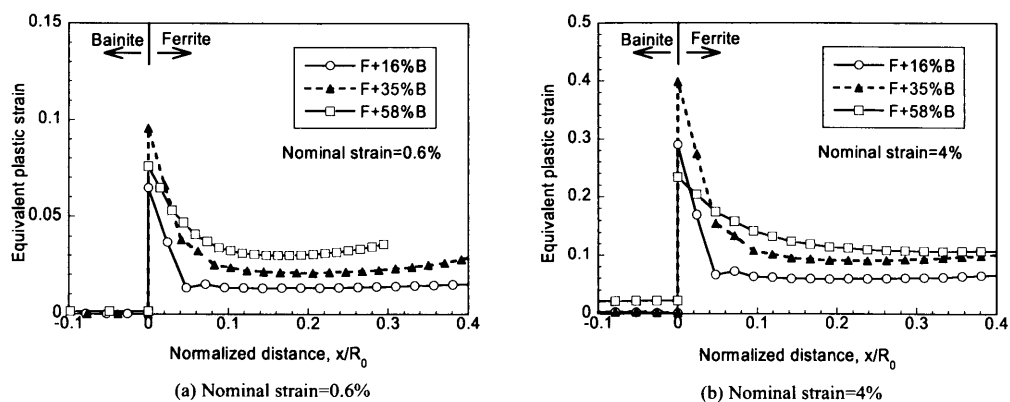


Fig. 11. Distribution of equivalent plastic strain around ferrite/bainite phase boundary.

F+16%B鋼が、Voronoi型セルモデルによるFEM解析ではF+35%B鋼が最も高く、実験、解析共にF+58%B鋼が低い n 値を示している。加工硬化挙動は高歪領域が組織中に伝播してゆく過程で変形応力が増加する現象であり、組織内部へ塑性化した領域を伝播させるためには、その駆動力として高い歪勾配が必要になると考えられる。また、Fig.11(b)のように、ベイナイト面積分率が高くなるとフェライト相のみでは全体の変形を吸収できなくなるため、ベイナイト相においても塑性変形を生じ、それによって歪勾配がさらに低下してくる。F+16%B鋼については実験とFEM解析結果の対応についてさらに検討が必要であるが、ベイナイト分率の上昇による n 値の低下挙動に関しては以上のような歪勾配の低下がその理由の一つと考えられる。

4. フェライト-ベイナイト鋼の応力歪関係に及ぼす第二相形態の影響

鋼管の耐座屈性能は鋼材の応力ひずみ曲線の影響を強く受け、連続降伏型の応力歪曲線で、さらに高 n 値の鋼管ほど限界座屈歪が向上する。このような応力歪曲線はマイクロ組織形態の影響を強く受けると考えられるため、最適な組

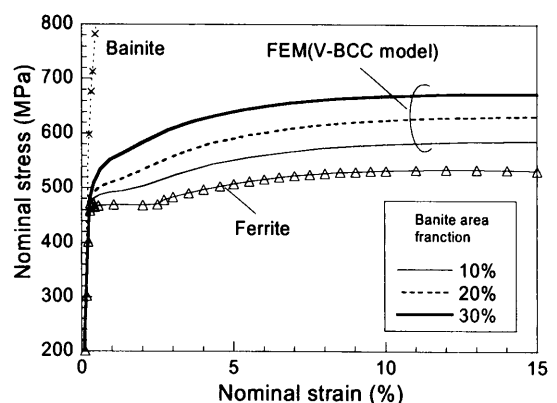


Fig. 12. Effect of bainite area fraction on stress-strain curves for the ferrite-bainite steels with bainite aspect ratio of 2.0.

織形態に関する知見を得ることを目的として、Voronoi型単位セルモデルを用いたフェライト-ベイナイト鋼の変形挙動解析を行う。

解析に使用したモデルはFig. 7と同様のVoronoi型単位セルモデルであり、初めに応力歪曲線の形状に対するベイナイト面積分率の影響をさらに詳細に調査した。Fig.12に応力歪曲線におよぼすベイナイト面積分率の影響を示す。ベ

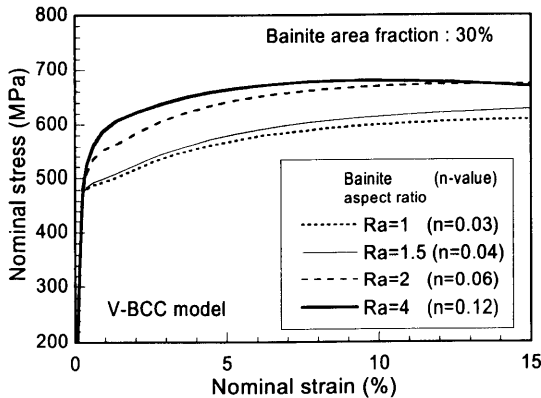


Fig. 13. Effect of bainite aspect ratio on stress-strain curves for the ferrite-bainite steels with bainite area fraction of 30%.

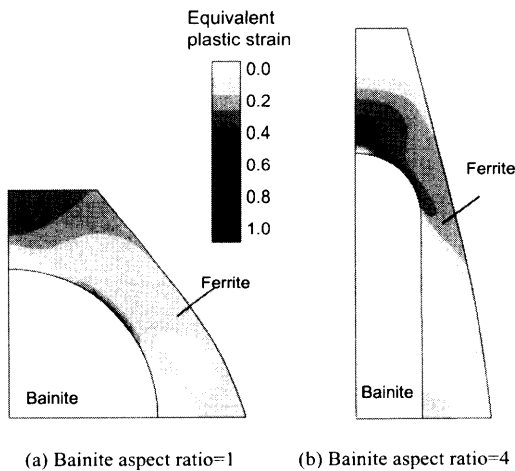


Fig. 14. Contour plots of equivalent plastic strain at nominal strain of 2%.

イナイト相のアスペクト比は2.0とし、解析に用いたベイナイトおよびフェライト相の応力歪曲線も一緒に示した。フェライト単相では降伏伸びを有しているが、ベイナイト面積分率が増加するに従い降伏伸びが小さくなり、ベイナイト体積率が30%ではほぼ連続降伏型の応力歪曲線となっている。また、Fig.13はベイナイト面積分率を30%としたときの応力歪曲線に及ぼすベイナイトアスペクト比(Ra)の影響を示す。ベイナイトアスペクト比が増加するに従って、低歪域での変形応力が大きく上昇しており、図中にも示したように、1~4%の歪領域でのn値が高くなっている。また、ベイナイトアスペクト比が1と4の場合の平均歪2%での相当塑性歪分布をFig.14に示す。アスペクト比1の場合はフェライト相全体が比較的均一に変形しているが、アスペクト比が4になると、ベイナイト相の先端部の歪集中が非常に大きくなっている。このような局所的な歪勾配の増大によって高いn値が得られるものと考えられる。以上の検討結果から、伸長した一定量のベイナイト相を含むフェライト-ベイナイト組織によって高い加工硬化特性が得られると考えられる。

5. 結言

フェライト-ベイナイト鋼の変形挙動に及ぼすマイクロ組織の影響を、ベイナイト分率のみが異なり各構成相の応力歪特性が等しい供試鋼を用いて調査した。また、Voronoi型単位セルモデルによりフェライト-ベイナイト鋼の巨視的および微視的変形挙動を解析した結果、以下の結論を得た。

(1) 引張強度はベイナイト面積分率に比例して増加するのに対して、降伏強度はベイナイト面積分率が低い範囲ではベイナイト面積分率増加に伴う強度上昇率が小さい。そのため、降伏比はベイナイト面積分率が40%程度で極小値を示した。一方、n値は二相組織化によって向上し、ベイナイト体積率が16~35%で高い値を示した。

(2) 第2相粒子を内包するVoronoi14面体によって二相組織をモデル化した単位セルモデルを用いることによって、フェライト-ベイナイト鋼の引張特性に及ぼすベイナイト面積分率の影響を精度良く再現できた。

(3) 組織内部の微視的な変形挙動を解析した結果、フェライト-16%および35%ベイナイト鋼においてはフェライト/ベイナイト界面近傍でのフェライト相への歪集中が大きくなるためにn値が上昇したと考えられる。一方、ベイナイト分率が高くなると、ベイナイト相の塑性変形によって歪集中度が低下するためn値も低下していると考えられる。

(4) フェライト-ベイナイト鋼の応力歪曲線および加工硬化特性に及ぼすマイクロ組織の影響を解析した結果、ベイナイト面積分率の上昇によりフェライト相で見られる降伏伸びが消失すること、およびベイナイトアスペクト比の増加によってn値が向上することが示された。

文 献

- 1) N.Shikanai, S.Sakui, H.Tagawa, I.Watanabe, H.Narita and H.Naganawa: *Nippon Kokan Tech. Rep.*, **122** (1988), 5.
- 2) K.Ohnishi, S.Suzuki, R.Sometani, H.Uchimura and Y.Kamata: *Sumitomo Met.*, **40** (1988), 277.
- 3) M.Ohashi, H.Mochizuki, T.Yamada, Y.Hagiwara, H.Kuwamura, Y.Okamura, Y.Tomita, N.Komatsu and Y.Funazu: *Seitetsu Kenkyu*, **334** (1989), 17.
- 4) N.Suzuki, A.Kato, M.Yoshikawa, M.Kurihara, J.Ohwaki and S.Endo: *NKK Tech. Rep.*, **167** (1999), 44.
- 5) S.Endo, N.Ishikawa, M.Kurihara, N.Suzuki, A.Kato and M.Yoshikawa: 溶接構造シンポジウム'99講演論文集, (1999), 79.
- 6) Y.Tomota, K.Kuroki, T.Mori and I.Tamura: *Mater. Sci. Eng.*, **24** (1976), 85.
- 7) Y.Tomota, M.Umemoto, N.Komatsubara, A.Hiramatsu, N.Nakajima, A.Moriya, T.Watanabe, S.Nanba, G.Anan, K.Kunishige, Y.Higo and M.Miyahara: *ISIJ Int.*, **32** (1992), 343.
- 8) J.D.Eshelby: *Proc. R. Soc. (London) A*, **A241** (1957), 376.
- 9) T.Mori and K.Tanaka: *Acta Metall.*, **21** (1973), 571.
- 10) Rudiono and Y.Tomota: *Acta Mater.*, **45** (1997), 1923.
- 11) T.Huper, S.Endo and N.Ishikawa: *ISIJ Int.*, **39** (1999), 288.
- 12) B.Karlsson and B.O.Sundstrom: *Met. Sci. Eng.*, **16** (1974), 168.
- 13) S.Socrate and M.C.Boyce: *J. Mech. Phys. Solids*, **48** (2000), 233.
- 14) N.Ishikawa, D.M.Parks, S.Socrate and M.Kurihara: *ISIJ Int.*, **40** (2000), 1170.
- 15) N.Shikanai, H.Kagawa and M.Kurihara: *ISIJ Int.*, **32** (1992), 335.