

厚肉高張力鋼の降伏挙動に及ぼす組織の影響

論文

鹿内伸夫*・香川裕之*²・栗原正好*²・田川寿俊*³

Influence of Microstructure on Yielding Behavior of Heavy Gauge High Strength Steel Plates

Nobuo SHIKANAI, Hiroyuki KAGAWA, Masayoshi KURIHARA and Hisatoshi TAGAWA

Synopsis :

The heavy-gauge HSLA steel plates with low yield ratio have been applied to the steel-frames of high-rise buildings to utilize the benefits of their high strength and uniform deformability. The yielding behavior of steels relates to the microstructural morphologies such as microstructure, volume fraction and shape of each phase, dislocation, grain size and so on. In the present paper, appropriate microstructural morphology for low YR HSLA steel was investigated by FEM analysis. The influence of shape, volume fraction and mechanical properties of each phase on yielding behavior were analyzed by dual-phase and tri-phase models. From a series of FEM analysis, it is clarified that the appropriate microstructural morphologies to decrease the YR are as follows. ① Uniform distribution of spherical high-hardness phase in low-hardness phase ② Around 50% volume fraction of low-hardness phase ③ Increase of the ratio of yield strength of high-hardness phase to that of low-hardness phase.

Key words : HSLA steel with low yield ratio; yield strength; tensile strength; FEM analysis; microstructure; dual-phase model; tri-phase model.

1. 緒 言

鋼の降伏挙動は、周知のように組織形態(広い意味で、ミクロ組織、結晶粒径、析出物、転位等を含む組織形態)に大きく影響される。そのため、降伏挙動を表す特性値である降伏強度(YS)、降伏比(YR)等を予測、制御するためには、組織形態の予測、制御が重要である。組織形態は同一の化学成分であっても、圧延、熱処理、加工熱処理等により制御することが可能であり、その結果として、降伏挙動も制御¹⁾²⁾できる。

その具体的な例としては、最近、鉄骨建築物のボックス柱用鋼として使用されてきている60 kgf/mm²(SM58)級の低降伏比(YR=約80%)厚肉高張力鋼^{3)~6)}がある。一般に、60 kgf/mm²級以上の高張力鋼は、良好な溶接性を維持しながら高い強度を確保するために、比較的low成分系の鋼を焼入れ-焼もどし(QT)処理することにより製造される。そのため、組織はベイナイト、マルテンサイト主体の組織になり、フェライト

(α)-パーライト組織である50 kgf/mm²級鋼に比較して、YRは85~95%とかなり高くなっている。それに対して、低降伏比60 kgf/mm²級高張力鋼は、特殊熱処理¹⁾を実施し、組織を α を含むベイナイト主体の複合組織に制御することにより、高い引張強度(TS)を維持しながら、YSを低く制御し低YR化を達成している。

本報告では、厚肉高張力鋼のYS、YRなどの特性値で表される降伏挙動を制御するための最適な組織形態を明らかにすることを目的として検討した結果を報告する。初めに、組織形態を変化させた鋼の引張特性、組織を調査し、両者の関係を定性的に明確にした。次に、その実験結果に基づいて作成した組織モデルを用いて、二次元有限要素法(FEM)による弾塑性解析⁷⁾を行い、降伏挙動に及ぼす組織形態の影響を明確にした。これらの解析結果から、降伏挙動を表す特性値であるYS、YRに関して考察し、YRを低下させるための基本的指針を明らかにした。

昭和63年・平成元年4月本会講演大会にて発表 平成元年4月21日受付 (Received Apr. 21, 1989)

* NKK 鉄鋼研究所 (Steel Research Center, NKK Corporation, 1-1 Minamiatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210)

*² NKK 鉄鋼研究所 工博 (Steel Research Center, NKK Corporation)

*³ NKK 研究総務部 工博 (Research Administration Dept., NKK Corporation)

Table 1. Chemical compositions of steels tested (mass%).

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Process
A	0.13	0.25	1.32	0.011	0.002	0.01	0.02	0.03	0.04	0.04	TMCP (T)
B	0.13	0.25	1.44	0.012	0.002	0.21	0.20	0.08	0.17	0.04	QQ'T, QT

Table 2. Manufacturing conditions of steels tested.

Steel	Process	Thickness (mm)	Slab reheating temperature (°C)	Finish-rolling temperature (°C)	Delayed time* (s)	Heat treatment (°C)
A	TMCP (T)	20	1 100	800, 730	30	Temper : 500
B	QQ'T QT	80	1 200	—	—	900Q-780Q'-580T
		80	1 200	—	—	900Q-600T

* Delayed time : Air cooling time from finish-rolling to accelerated-cooling

2. 引張特性に及ぼす組織形態の影響

2.1 実験方法

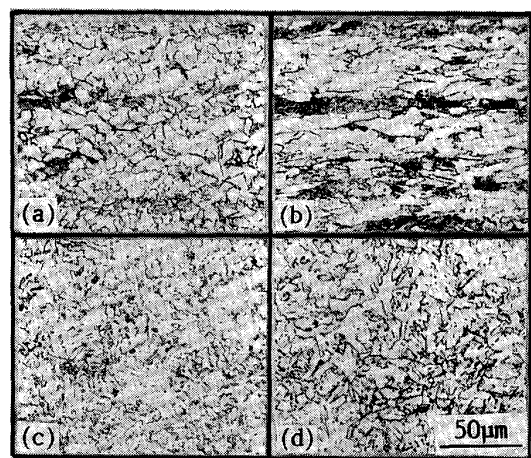
Table 1 に供試鋼の化学成分, Table 2 に製造条件を示す。鋼Aは実験室圧延機を用いて制御圧延-加速冷却(TMCP)を行った板厚 20 mm 材である。圧延仕上温度は 800°C, 730°C の二水準とし, 圧延終了後 30 s 空冷してから水冷した。一部の鋼は, 500°C で焼もどし処理を実施した。鋼Bは工場圧延の板厚 80 mm 材であり, 低 YR 化のために特殊熱処理として二相域からの焼入れ処理(Q')と, 比較のために通常の QT 処理を行った鋼である。これらの供試鋼に関して, 引張試験, ミクロ組織観察を行うとともに, 微小組織部分のマイクロビッカース硬度も測定した。

2.2 実験結果

2.2.1 組織形態

Photo. 1 に顕微鏡組織を示す。鋼Aの 800°C 仕上材では整粒 α とベイナイト (またはマルテンサイト) の複合組織が観察される。730°C 仕上材の組織は, 二相域圧延を行っているため展伸した複合組織である。QQ'T 処理を行った鋼Bの組織はベイナイト主体の組織の中に, Q' 処理によって生じた α とマルテンサイトが存在しており, 三相以上の複合組織になっている。また, 鋼Bの QT 処理材の組織は, α を含まないベイナイト主体の組織である。

Table 3 に鋼A, Bの α , ベイナイト, マルテンサイト各相の体積分率の測定結果を示す。各相の識別は, ミクロ組織観察 (400 倍) で行った。ミクロ組織観察程度では, ベイナイトとマルテンサイトを明確に識別することは困難である場合があるため, 鋼Aと鋼Bの QT 材に関しては, 両相を第二相としてまとめて示した。鋼Bの QQ'T 材では, 初めに, α , マルテンサイトとして明らかに識別できる相の体積分率を求め, それ以外の残り



(a) Steel A : FT=800°C (b) Steel A : FT=730°C
(c) Steel B : QQ'T (d) Steel B : QT

Photo. 1. Microstructure of steels tested.

Table 3. Volume fraction of each phase*.

Steel	Process	Volume fraction (%)			B + M
		Ferrite (a)	Bainite (B)	Martensite (M)	
A	800°CFT	59	—	—	41
	730°CFT	73	—	—	27
B	QQ'T	29	56	15	71
	QT	0	—	—	100

* : Measured by observation of microstructure

の相をベイナイトとした。

鋼Aでは, 仕上温度の低下により α 体積分率が增大し, 第二相の体積分率が減少する。鋼Bの QT 材の組織は, ベイナイト + マルテンサイトの体積分率が 100% である。QQ'T 材では, α , ベイナイト, マルテンサイトの各相の体積分率はそれぞれ 29%, 56%, 15% である。今回の各相の体積分率の測定は, ミクロ組織観察で行っているため, 特に鋼Bの QQ'T 材では, 微細な α , マルテンサイトの一部もベイナイトの体積分率の中に含まれていると考えられる。したがって, 実際には, ベイナイ

トの体積分率は測定値よりも、若干、少なくなっていることが予想される。

このように、圧延条件、熱処理条件を制御することにより、 α 、ベイナイト、マルテンサイト等の組織の形状(整粒, 展伸粒), 体積分率等を変化させることが可能であり、種々の組織形態を得ることができる。

2.2.2 組織形態と機械的性質

Table 4 に鋼 A, B の引張特性を示す。鋼 A の引張特性は仕上温度により異なっており、800°C 仕上材の整粒組織鋼の方が、730°C 仕上材の展伸組織鋼に比較して YR が低くなる傾向が示されている。また、焼もどし処理により TS の低下, YR の上昇が示される。鋼 B の QQ'T 材, QT 材は、ともに整粒組織鋼であるが、Q' 処理によって生成した α を含む QQ'T 材の方が低 YR である。

このように、組織形態により高張力鋼の引張特性は複雑に変化しており、引張特性の制御が比較的広い範囲で制御可能であることが示されている。今回の実験の範囲では、引張特性は、YS: 約 430~560 MPa, TS: 約 580~730 MPa, YR: 約 65~85% の範囲である。

Table 4. Tensile properties of steels tested.

Steel	Process	YS (MPa)	TS (MPa)	YR (%)
A	TMCP (FT=800)	435	665	65.4
	TMCP-T (FT=800)	468	584	80.1
	TMCP (FT=730)	559	727	76.9
	TMCP-T (FT=730)	532	625	85.1
B	QQ'T	451	600	75.2
	QT	544	642	84.7

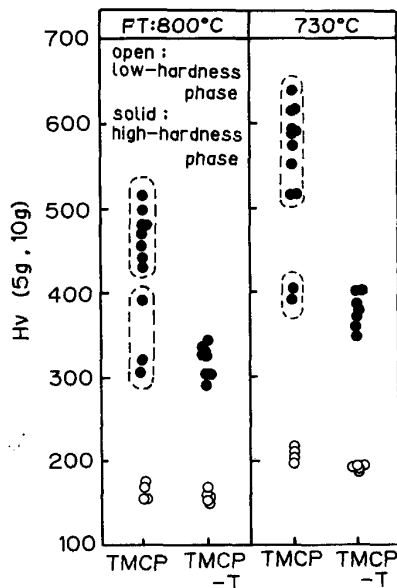


Fig. 1. Micro-vickers hardness of steel A.

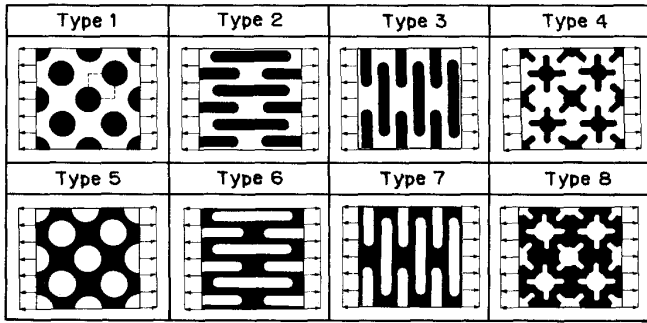
Fig. 1 に鋼 A の各相のマイクロビッカース硬度測定結果を示す。マイクロ組織観察程度で識別できる範囲で α と第二相の硬度を測定した。TMCP 材では、HV 150~200 程度の硬度の低い相と HV 400 以上の高い硬度を示す相の他に、HV 200~400 の中間の硬度を示す相の三種類の相が認められる。硬度の低い相は α である。また、マイクロ組織観察では必ずしも明確に識別できなかった第二相については、高い硬度を示す相がマルテンサイトであり、中間の硬度を示す相がベイナイトであると考えられる。また、各相の硬度は圧延仕上温度の変化に対応して変化しており、低温仕上材 (730°C 仕上材) の方が全体に高めの硬度である。Table 3, 4 で示したように、低温仕上材の方が α 体積分率が高くなっているにもかかわらず、高い強度を示すのは、マイクロ組織観察では同一と考えられる相でも、その機械的性質が異なっているためである。また、焼もどし処理を行った TMCP-T 材の第二相の硬度は、TMCP 材に比較して顕著に低下するが、 α の硬度低下は比較的小さく、各相の硬度の差 (硬度比) が小さくなっている。

3. 二相組織鋼の降伏挙動の解析および考察

3.1 解析方法

第2章では、いくつかの異なった組織形態を有する鋼の組織分率、機械的性質等を調査し、組織形態の制御により引張特性も比較的広範囲に変えることができることを定性的に明らかにした。ここでは、複合組織鋼の降伏挙動に及ぼす組織形態の影響を定量的に明らかにすることを目的として、まず各組織因子の影響を単純化して検討するために、二相組織鋼を対象とした FEM 解析を行った。検討した組織因子は、①軟質相の体積分率、②硬質相と軟質相の降伏強度比、③硬質相と軟質相の形状、分布形態等である。実際の二相組織鋼では硬質相と軟質相は三次元的に分布しているが、ここでは、解析を簡便化し、平面歪み状態を仮定した二次元 FEM により解析した。降伏挙動を表す特性値としては、0.2% 耐力 (0.2% PS) を用いた。

Fig. 2 に解析対象とした組織モデルを示す。これらのモデルは、第2章で示した実用鋼に近い組織形態を念頭に置いてモデル化したものである。Type 1~4 は軟質相中に硬質相が均等分布するモデルであり、それぞれ、硬質相形状を円, 長円 (長手方向が引張負荷方向と平行), 長円 (同直角), 花形とした。一方、Type 5~8 は Type 1~4 と同様の形状で、硬質相中に軟質相が均等分布するモデルである。これらの組織モデルの対称性を利用して、組織の一部の領域を取り出してメッシュ分割



□: Low-hardness phase ■: High-hardness phase

Fig. 2. Simplified models for two-dimensional FEM analysis.

し解析した. また, 実際の鋼における各相の大きさは, 通常, 数 μm ~ $100 \mu\text{m}$ 程度以下であるが, FEM 解析においては各相の大きさの比率にしたがって計算を実施した.

FEM 計算は構造解析プログラム (THANKS)⁸⁾ を用いて実施した. 解析にあたっては, 硬質相, 軟質相ともその応力-歪み関係を二直線近似した. 軟質相の YS は軟鋼の強度水準を念頭に置いて, 294 MPa 一定と仮定した. 硬質相の YS は Fig. 1 のマイクロビッカース硬度測定結果で示したように, 実際の鋼の軟質相と硬質相の硬度比が約 1.5~3.3 の範囲であることを念頭に置き, 441~883 MPa (降伏強度比: 硬質相の降伏強度/軟質相の降伏強度 = 1.5~3.0) まで変化させた. 硬度と YS の関係は硬度と TS の関係とは異なり, 必ずしも良好な対応関係はないが, 一応の目安として傾向を表しているものと考えられる. また各相の加工硬化係数は 245 MPa 一定と仮定した.

FEM 解析結果と比較するための混合則による検討は, (1)式に基づいて行った. ただし, FEM 解析では平面歪み状態を仮定しており, この場合, 応力の三軸度が増すため YS, 加工硬化係数は上記の値の $(1 - \nu + \nu^2)^{-1/2} = 1.125$ 倍 (ν : ポアソン比) になる. したがって, 混合則の計算にあたっては, 硬質相と軟質相の YS, 加工硬化係数を 1.125 倍した値を用いた.

$$\sigma = \sigma_a \cdot f_a + \sigma_b \cdot f_b \dots\dots\dots (1)$$

σ : YS (a 相 + b 相)

σ_a : 第一相 (a 相) の YS

σ_b : 第二相 (b 相) の YS

f_a : 第一相 (a 相) の体積分率

f_b : 第二相 (b 相) の体積分率

3.2 軟質相体積分率の影響

Fig. 3 に Type 1, 5 のモデルで軟質相体積分率を変化させた場合の FEM 解析から得られた応力-歪み線図

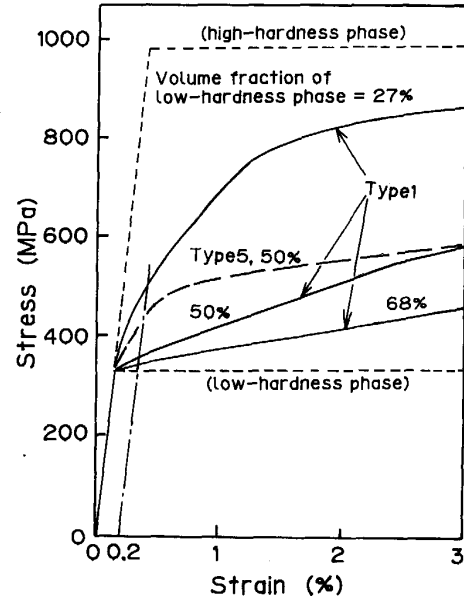


Fig. 3. Influence of volume fraction of low-hardness phase on stress-strain curves of Type 1 and 5 models.

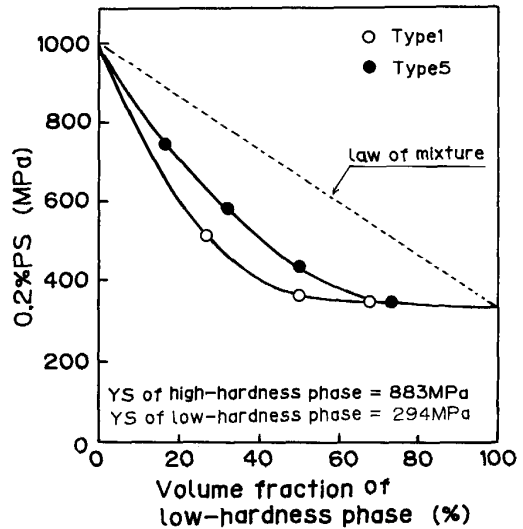


Fig. 4. Influence of volume fraction of low-hardness phase on 0.2%PS (FEM).

を示す. 図中には比較のため, 軟質相, 硬質相のみの単一相における応力-歪み線図も点線で示した. なお, 3.1 で述べたように, FEM 計算では平面歪み状態を仮定しているため, 比較となる単一相の YS も単軸引張での YS の 1.125 倍の値で示してある. 二相組織モデルでは, 軟質相の体積分率が増加するにしたがって, 応力-歪み線図が低応力側に移行している. また, Type 1, 5 を比較すると, 軟質相の体積分率が同一でも, 応力-歪み線図の形が異なっているのが示されている.

Fig. 4 に Type 1, 5 の軟質相体積分率と 0.2% PS

(FEM) の関係を混合則と比較して示す。軟質相体積分率が 0% および 100% の場合には、均質組織となるため、0.2% PS (FEM) は当然混合則に一致する。これに対して、軟質相体積分率が 0, 100% 以外の場合には、0.2% PS (FEM) は 0.2% PS (混合則) よりも低応力を示し、体積分率が約 50% 以上では 0.2% PS (FEM) は軟質相の YS とほぼ一致している。また、Type 1, 5 を比較すると、軟質相体積分率が同じ場合でも Type 1 の方が 0.2% PS (FEM) が低くなっていることが示されている。

3.3 降伏強度比の影響

Fig. 5 に Type 1, 5 の 0.2% PS (FEM) と軟質相、硬質相の降伏強度比の関係を混合則と比較して示す。0.2% PS (FEM) は 0.2% PS (混合則) より低応力側に計算され、両者の差は降伏強度比が大きい場合により顕

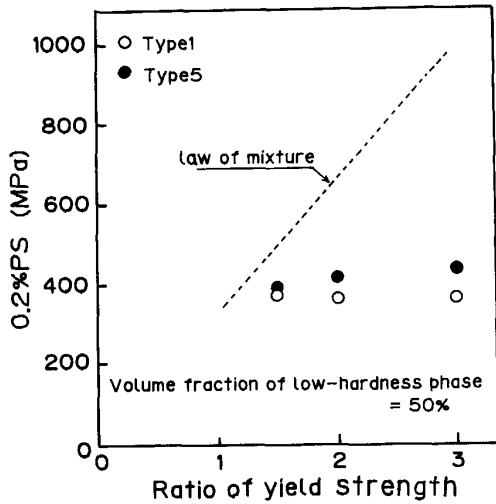


Fig. 5. Relationship between ratio of yield strength of high-hardness phase to that of low-hardness phase and 0.2%PS (FEM).

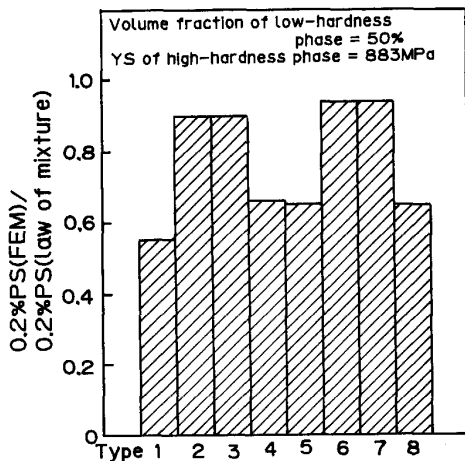


Fig. 6. Ratio of 0.2%PS (FEM) to 0.2%PS (law of mixture) of each model.

著となっている。降伏強度比が低下すると 0.2% PS (FEM) は 0.2% PS (混合則) に近づく傾向を示すが、降伏強度比が 1.5 まで低下しても両者は一致しない。また、軟質相中に円状硬質相が均等分布する Type 1 の方が Type 5 に比較して、0.2% PS (FEM) は低い値を示す。

3.4 硬質相と軟質相の形状と分布形態の影響

Fig. 6 に、軟質相体積分率を 50% と一定にした場合の 0.2% PS (FEM) と 0.2% PS (混合則) との比を各モデルについて示す。軟質相中に円状硬質相が均等分布 (Type 1) する場合に、0.2% PS (FEM) が 0.2% PS (混合則) に比較して最も低い応力になる。また、軟質相あるいは硬質相の形状が長円 (Type 2, 3, 6, 7) のときに両者は近づき、他の Type に比較して高応力になることが示されている。この傾向は第 2 章で示したように、整粒組織鋼である鋼 A の 800°C 仕上材の YS が、展伸組織鋼である鋼 A の 730°C 仕上材に比較して低い値を示すことと対応している。

Fig. 7 に Type 1, 2, 5 の応力-歪み線図の FEM 解析結果を示す。S, U, T 点は、Type 1, 2, 5 で硬質相が一部降伏を開始した点である。Type 2, 5, 1 の順で硬質相が降伏を開始する歪み量が大きくなっている。また、Type 2 の V 点以降では、硬質相がほぼ全域で降伏しており、応力-歪み線図がほぼ混合則にしたがうことが示されている。

Fig. 8 に Fig. 7 の S, U, T 点 (硬質相が一部降伏する点) における Type 1, 2, 5 の硬質相の降伏域と軟

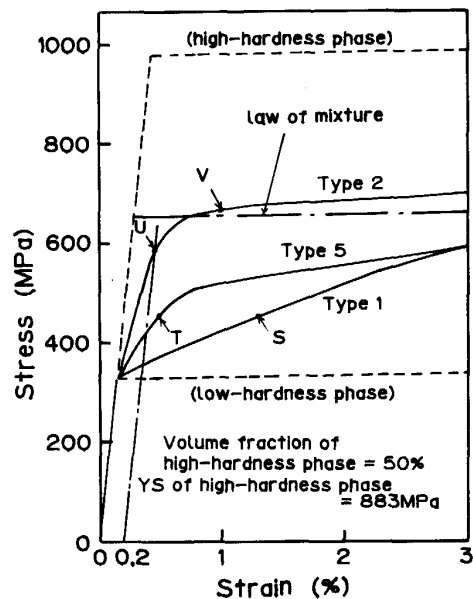
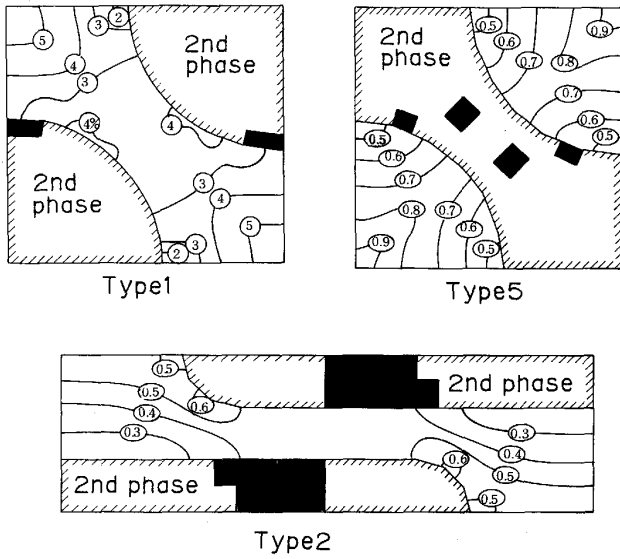


Fig. 7. Stress-strain curves of Type 1, 2 and 5 models.



■ : Yielding area in high-hardness phase
 The number in a circle : Plastic strain

Fig. 8. Distribution of yielding area in high-hardness phase and relative plastic-strain in low-hardness phase at S, T and U positions in Fig. 7.

質相の相当塑性歪み分布を示す。硬質相降伏開始時の軟質相中の相当塑性歪みの最大値は Type 1 で 5%, Type 2 で 0.6%, Type 5 で 0.9% 程度となっている。塑性歪み量の相異は、各 Type の結晶粒間相互作用の相異に起因するものと考えられる。Type 1 では結晶粒間相互作用が弱く硬質相による拘束が緩やかであるのに対して、Type 2 では、結晶粒間相互作用が強く硬質相による拘束が比較的厳しく作用している。また、どのモデルにおいても、引張歪みが 0.5~1.5% 程度の変形の初期段階では軟質相に歪みが集中していることが認められる。

3.5 降伏比制御のための組織制御の検討

前項までの解析結果に基づいて、ここでは、低降伏比高張力鋼に適した組織形態に関して YR の観点から検討する。YR の計算は、 $YR = 0.2\% PS (FEM) / TS$ (混合則) とした。Fig. 7 で示したように、硬質相がほぼ全域で降伏を終了した以降 (歪み量が数%以上) では、応力-歪み線関係はほぼ混合則にしたがう。このことより、TS の値として混合則から計算される値を用いても著しい誤差は生じないと考えられる。

Fig. 9 に二相組織モデルにおける組織形態と YR の関係を示す。円状の硬質相が均等分布する Type 1 で軟質相体積分率が約 50% の場合に、YR は最も低い値 (約 50%) を示す。軟質相あるいは硬質相が長円状である場合には、YR は軟質相体積分率の増加に伴い若干低下するものの高い値を示している。

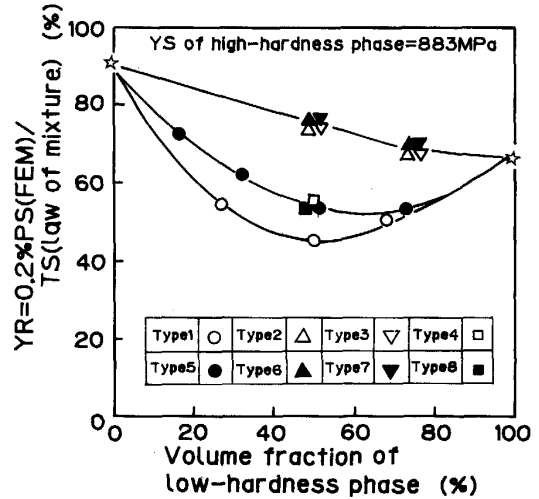


Fig. 9. Relationship between volume fraction of low-hardness phase and yield ratio of each model.

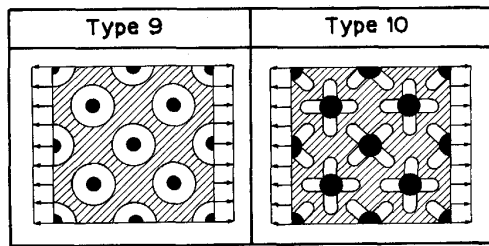
つまり、YR を低下させるための組織形態の基本的な考え方として、①軟質相中に整粒の硬質相が均等分布し、②軟質相体積分率を約 50% 程度とすることが挙げられる。これらの指針は、Fig. 4 に示したように、0.2% PS を低下させるための組織形態と同様であり、0.2% PS の低下によって YR が低下すると考えられる。さらに、Fig. 5 から明らかなように、各相の降伏強度比が上昇すると 0.2% PS (FEM) と 0.2% PS (混合則) の差が大きくなり 0.2% PS (FEM) が低応力を示す。一方、TS はほぼ混合則にしたがい、降伏強度比の上昇により TS も上昇する。したがって、YR を低下させるためには、③各相の降伏強度比を上昇させることも有効である。

4. 三相組織鋼の降伏挙動の解析および考察

4.1 三相組織鋼の降伏挙動の解析

前章までは、二相組織鋼を前提としたモデルにより FEM 解析を行い、二相組織鋼の降伏挙動に及ぼす各相の体積分率、形状、降伏強度比等の影響を明らかにした。ここでは、より実用鋼に近い組織形態である三相組織鋼の降伏挙動に及ぼす組織形態の影響に関して FEM 解析を行い検討した。

Fig. 10 に解析に用いた組織モデルを示す。Type 9, 10 とともに、マルテンサイトの周辺に α が付着した相がベイナイト中に分布した三相組織モデルである。FEM 解析結果は、鋼 B の QQ'T 材と比較することを目的として、解析モデルの各相の体積分率を Table 3 に基づいて仮定した。ここでは、解析を簡便化することと、Q' 処理時に生成する α とマルテンサイトが特徴的な組織形態であり降伏挙動に大きく影響していると考えられることから、 α 、マルテンサイトの体積分率を変化させ



- : Low-hardness phase : Ferrite
(YS = 294MPa, TS = 392 MPa)
Volume fraction : Type 9=34%, Type 10=25%
- ▨ : Middle-hardness phase : Bainite
(YS = 540 MPa, TS = 638 MPa)
Volume fraction : Type 9=50%, Type 10=50%
- : High-hardness phase : Martensite
(YS = 883 MPa, TS = 981 MPa)
Volume fraction : Type 9=16%, Type 10=25%

Fig. 10. Simplified models of tri-phase material for two-dimensional FEM analysis.

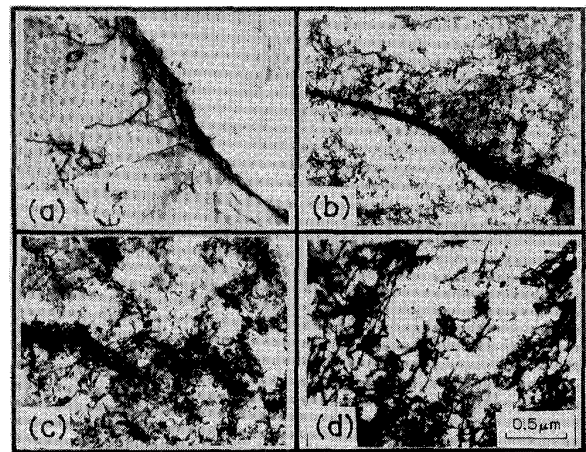
ベイナイトの体積分率は 50% 一定とした。解析にあたっては、第 3 章での FEM 解析と同様に組織の対称性を利用して組織モデルの一部を取り出してメッシュ分割し解析した。また、Table 4 で示した鋼 B の QQ'T 材の特性と FEM 解析結果から得られた特性を比較するため、ここでは、YR を比較の特性値として用いた。

計算された YR は、Type 9 で 74%、Type 10 で 73% である。0.2% PS が混合則に従うと仮定して計算すると、YR は Type 9 で 84%、Type 10 で 85% となり、FEM 解析結果に比較してそれぞれ約 10% 程度 YR が高めに計算される。一方、Table 4 で示したように鋼 B の QQ'T 材の YR の実測値は約 75% であり、FEM 解析結果と良い一致を示している。つまり、混合則では複合組織鋼の降伏挙動 (YR, 0.2% PS 等) を精度良く表現できないと考えられる。また、この結果は、実際に特殊熱処理により製造されている低降伏比高張力鋼の組織形態が、YS (0.2% PS) の低下 (同時に YR の低下) に対して有利で、かつ、適切な組織形態になっていることを示していると考えられる。

4.2 三相組織鋼の降伏挙動の検証

第 3 章での FEM 解析結果から、歪み量が 1.5% 程度以下の変形の初期段階では、軟質相に歪みが集中していることが示唆された。そこで、この解析結果を検証するために引張予歪みを 0~1% 与えた試験片を用いて、軟質相である α の歪み量の状況を電子顕微鏡により観察した。供試鋼は Table 1 に示した鋼 A の 800°C 仕上材であり、 α +ベイナイト+マルテンサイトの複合組織鋼である。

Photo. 2 に予歪み付与材の電子顕微鏡組織観察結果を示す。歪み量 0% においては、 α 中の転位はごくわず



(a) $\epsilon = 0\%$ (b) $\epsilon = 0.1\%$ (c) $\epsilon = 0.3\%$ (d) $\epsilon = 1.0\%$
(Steel A : Finish-rolling temperature=800°C)

Photo. 2. Transmission electron micrographs of pre-strained steels.

かであるが、複合組織鋼全体としては、まだ弾性限内であると考えられる歪み量 0.1% において、すでに転位密度が顕著に増加しているのが観察される。このように、平均的な歪み量が、かなり小さい条件下でも軟質相に顕著な転位密度の増加が認められており、FEM 解析結果と同様の傾向が確認された。

5. 結 言

(1) TMCP (T), QQ'T 等のプロセスで製造した鋼の組織は、マイクロピッカース硬度測定結果等から、単純な二相組織ではなく三相以上の組織を含む複合組織であることを明らかにした。

(2) 二相組織鋼を対象とした FEM 解析結果から、降伏挙動を制御するための組織形態として、YR を低下させるためには、①軟質相中に整粒の硬質相が均等分布し、②軟質相体積分率を 50% 程度にし、③各相の降伏強度比を高めること等が効果的であることを明らかにした。

(3) 特殊熱処理によって製造された低降伏比高張力鋼を前提とした実用鋼の組織は三相以上の組織を含む複合組織であるが、三相組織モデルによる解析結果は比較的良い精度で実際の鋼の YR を予測できることが明らかになった。

(4) FEM 解析結果から示された軟質相への歪みの集中に関しても、検証実験を行い、変形の初期段階において軟質相への歪みの集中の可能性が示唆された。

文 献

- 1) 鹿内伸夫, 田川寿俊, 渡邊 之, 作井 新, 長縄 裕, 岩崎宣博: 鉄と鋼, **73** (1987), S 345
- 2) 鹿内伸夫, 栗原正好, 田川寿俊: 鉄と鋼, **73** (1987), S 1312

-
- 3) 福田 豊: NIKKEI ARCHITECTURE (1987) 287, p. 158
4) 鋼構造ジャーナル (1986) 10, p. 1, p. 28
5) 鹿内伸夫, 作井 新, 田川寿俊, 渡邊 之, 成田 宏, 長縄 裕: 日本鋼管技報 (1988) 122, p. 5
- 6) 加藤 勉: 鉄と鋼, 74 (1988), p. 951
7) 香川裕之, 鹿内伸夫, 栗原正好, 田川寿俊: 材料とプロセス, 1 (1988), p. 528
8) 内山昭一, 木下文雄: 日本鋼管技報 (1978) 80, p. 107
-