

# ベイニティック・フェライト組織高強度熱延鋼板の伸びフランジ性

鹿島 高弘\*・橋本 俊一\*

Stretch-flangeability of High Strength Hot Rolled Steel Sheets with Bainitic-ferrite Microstructure

Takahiro KASHIMA and Shunichi HASHIMOTO

**Synopsis** : Recently, high strength hot rolled steel sheets have been applied to mainly chassises and wheels and high formability, especially high stretch-flangeability is required on those parts. Bainitic-ferrite single phase microstructure has been proposed to obtain the high stretch-flange formability. In this paper, the effects of metallurgical factors of bainitic-ferrite single phase microstructure on stretch-flangeability is studied.

The effects of atomic ratio of Ti by C of the bainitic ferrite steel and the void creation morphology of bainitic-ferrite, bainite and ferrite-pearlite steel after stretch flange formation are investigated. The bainitic-ferrite steels with access of 1.0 atomic ratio of Ti by C shows highest stretch-flangeability among the studied steels because cementite is not existed.

Cementite existed in bainitic-ferrite steels with 0.5 atomic ratio of Ti by C, bainite and ferrite-pearlite steels, causes the void initiation during stretch flange formation. In addition of above mentioned, the stretch-flangeability is deteriorated by TiC precipitate and increase grain size.

**Key words** : high strength hot rolled steel sheets; stretch-flangeability; bainitic-ferrite; cementite; TiC precipitate; grain size.

## 1. 緒言

近年、自動車の安全性向上および軽量化の要求から、鋼板の高強度化と優れた加工性が要求されている。なかでも、590~780 N/mm<sup>2</sup>級の高強度熱延鋼板は自動車の足回り部材に利用され、高い強度とともに高い伸びフランジ性が求められている<sup>1-5)</sup>。高強度鋼板には、これまで加工性に富む軟質相のポリゴナル・フェライトを母相として、硬質相のマルテンサイトやベイナイトなどの第2相を導入した複合組織鋼板が利用されてきた。しかし、これら複合組織を持つ鋼板では、母相と第2相の硬度差が大きいため、強い加工を受ける打ち抜きや穴広げを行った際に第2相と母相の界面より多数のボイドが発生し、伸びフランジ性を向上させることができなかつた<sup>6-9)</sup>。また、第2相とフェライト相を持つ複合組織鋼板が伸びフランジ性向上に不利なことから、第2相のない単相組織としてベイナイト単相鋼板の報告例もある<sup>6,10)</sup>。

これまで、著者らは高強度かつ伸びフランジ性を向上させる組織として第2相がなく、強度を確保できる転位密度の高いベイニティック・フェライト単相組織を提案してきた<sup>11,12)</sup>。本研究では、おもに低 C-Ti 添加鋼のベイニティック・フェライト単相組織鋼板について、伸びフランジ性への冶金的因子の影響を明確にするために調査した。

## 2. 実験条件

Table. 1 に供試材の化学成分を示す。鋼Aおよび鋼Bは、0.05%C-0.5%Si-1.5%Mn系にTiを添加した鋼種であり、Ti量の影響を調査するためにC量との原子当量比で1.3および0.5のTi量をそれぞれ添加している。以降、それぞれTi/C=1.3、Ti/C=0.5と略す。また、鋼CはC-Mn-Cr系鋼種で、おもにベイナイト単相組織について、低C-Ti添加鋼で得られるベイニティック・フェライト組織と比較するために用意した。

次に実験条件について述べる。Table. 1 に示す供試材を真空溶解法にて作製した。この供試材を粗圧延を行って30 mm厚のスラブとし、これを再び1250°Cに加熱して30分保持後、仕上温度(FDT) 850°Cにて30 mm厚から3.5 mm厚まで5パスの圧延を行った。その後巻取処理相当温度(CT)である室温から700°Cまでおよそ70°C/sで冷却したあと、各温度に30分保持して炉冷を行った。また、仕上温度の影響についても調べるために鋼Aを用いて、巻取温度

Table. 1. Chemical compositions.

Steel	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	Cr	Ti/C (atomic ratio)
A	0.049	0.53	1.46	0.010	0.0017	0.033	0.26	—	1.28
B	0.049	0.54	1.49	0.010	0.0011	0.034	0.10	—	0.51
C	0.100	0.50	1.47	0.007	0.0017	0.042	—	0.53	—

平成12年9月8日受付 平成12年12月15日受理 (Received on Sep. 8, 2000; Accepted on Dec. 15, 2000)

\* (株)神戸製鋼所加古川製鉄所技術研究センター (Research & Development Laboratory, Kakogawa Works, Kobe Steel, Ltd., 2222-1 Ikeda Onoe-cho Kakogawa 675-0023)

は450°Cとし、その他の条件はそのまま仕上げ温度を800~940°Cまで変化させて実験を行った。調査には組織観察、2.5mm厚まで表裏面を研削したL方向のJIS5号引張試験(JIS Z 2241)および穴広げ試験(JIS T 1001)を行った。

### 3. 実験結果

#### 3.1 巻取温度の影響

Fig. 1 に機械的特性に及ぼす巻取温度の影響を示す。低C-Ti添加鋼の鋼A (Ti/C=1.3) については室温から500°C巻取まで強度はほぼ780 N/mm<sup>2</sup>以上を有しており、500°Cを超えると強度が低下する。伸びについては600°Cまではほぼ15~20%程度であったが、それを越えた温度では顕著に高くなる。伸びフランジ性を評価する穴広げ限界値(λ値)は550°C巻取で急激に低下する特異な温度が存在するが、この温度域を除いては100%から110%程度が得られる。鋼B (Ti/C=0.5) ではやや強度が低いにもかかわらずλ値

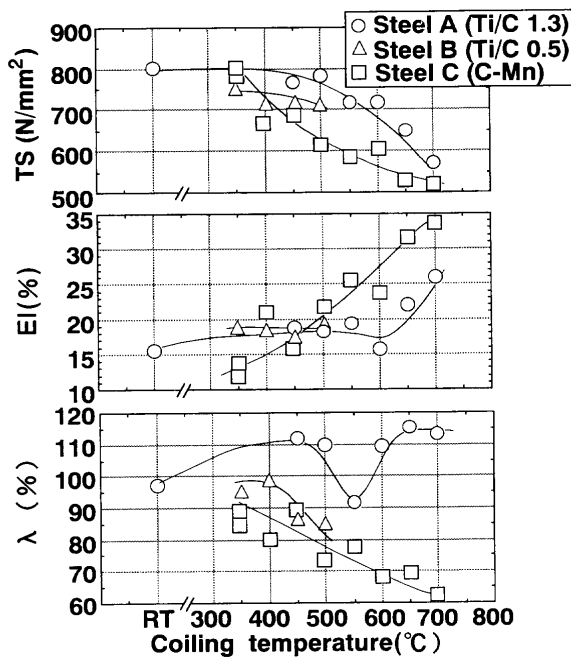


Fig. 1. Effect of coiling temperature on mechanical properties of steel A, B, and C.

は鋼Aに比べて低い。鋼Cについては、350°C巻取で800 N/mm<sup>2</sup>程度の強度に達しているが巻取温度が高くなるにつれて強度が低下し、それに伴って伸びが高くなる。その一方で、λ値については強度の低下にもかかわらず低くなる。

鋼Aについて各巻取条件でのTEM組織を観察した。450°C巻取では転位密度の高いグラニューラ状のベイニティック・フェライト組織を呈しており、Fig. 2 にはそのTEM組織を示す。ここでは示していないが、500°C以下の巻取の場合ではすべてグラニューラ状のベイニティック・フェライト組織、650°C以上の巻取ではポリゴナル・フェライト組織となっており、550°Cや600°Cではグラニューラ状のベイニティック・フェライト組織とポリゴナル・フェライト組織が混合した組織であった。鋼Cについては、450°C巻取以下ではベイナイト単相組織であり、500°C以上の巻取ではフェライト・パーライト組織であった。その一例としてFig. 3 には、350°C巻取と550°C巻取のSEM写真を示す。

ベイニティック・フェライトの組織の定義においては、鋼のベイナイト写真集<sup>13)</sup>によれば、転位密度が高くラス状の組織を呈しているものを言い、転位密度が高いものこの組織が回復してラス状組織のないものをグラニュー

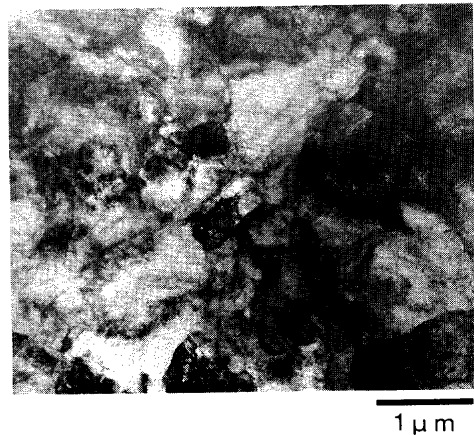


Fig. 2. Transmission electron microstructure of steel A at CT 450°C.

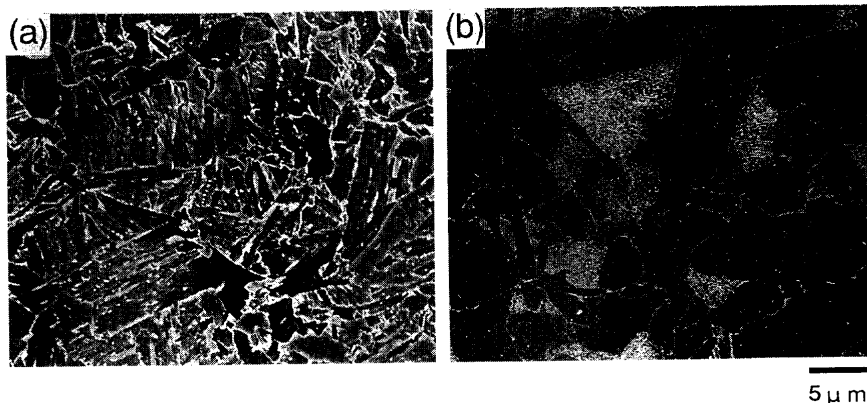


Fig. 3. Scanning electron microstructures of steel C (a) CT350°C, (b) CT550°C.

ラー・ベイニティック・フェライト組織という分類がなされている。この定義に従えば、上記の組織はグラニューラー・ベイニティック・フェライト組織というべきものであるが、これも転位密度の高いベイニティック・フェライト組織の一形態と考えられるため、以降においてはベイニティック・フェライト組織と呼ぶこととした。

3.2 熱延仕上温度の影響

Fig. 4 には、熱延仕上温度の TS、 $\lambda$  値に及ぼす影響を示す。940°C の高い仕上温度では  $\lambda$  値は低い、仕上温度が低くなるにつれて  $\lambda$  値が高くなり、850°C で最も高くなる。850°C 以下の仕上温度では 2 相域であるために、加工フェライトとベイニティック・フェライトが混在するため、急激に  $\lambda$  値が低下する。Fig. 5 には、仕上温度が 850°C 以上の結晶粒径 (15° 以上の大角粒界を持つ結晶粒径) を EBSP (Electron Backscattering Pattern) により観察した結果を示しており、結晶粒径は仕上温度が低くなるとともに細粒となる。後述するが仕上温度が 850°C まで低くなることにより、結晶粒径が微細化し、 $\lambda$  値が向上したものと思われる。

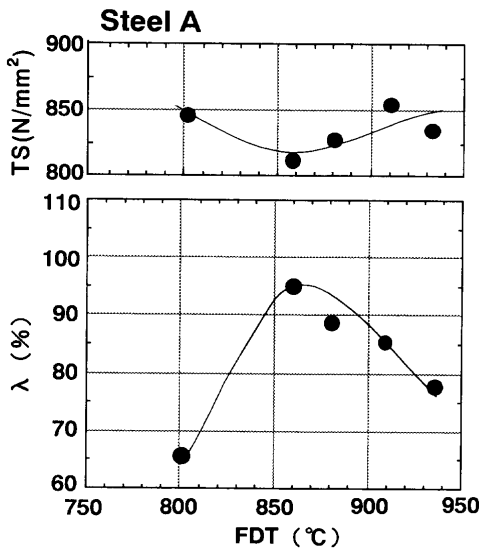


Fig. 4. Effect of FDT on TS and  $\lambda$  value.

4. 考察

4.1 各組織の TS- $\lambda$  バランス

Fig. 6 には、実験結果で得られた各組織についての TS- $\lambda$  バランスと TS-EI バランスを示す。このなかで、ベイニティック・フェライト単相組織 (Ti/C=1.3) が最も TS- $\lambda$  バランスが優れている。ポリゴナル・フェライト単相組織とベイニティック・フェライト単相組織ではどちらも単相組織で同程度の高い  $\lambda$  値を有しているが、ベイニティック・フェライト単相組織の TS は高く、このため TS- $\lambda$  バランスも高くなっている。フェライト・パーライト組織は最も TS- $\lambda$  バランスが低い。700~800 N/mm<sup>2</sup> の高強度を有する組織で  $\lambda$  値を比較すると、Ti/C が 1.3 のベイニティック・フェライト組織が最も  $\lambda$  値が高く、ついで Ti/C が 0.5 のベイニティック・フェライト組織であり、ベイナイト単相組織が最も低い。これらは、同程度の TS であるにもかかわらず

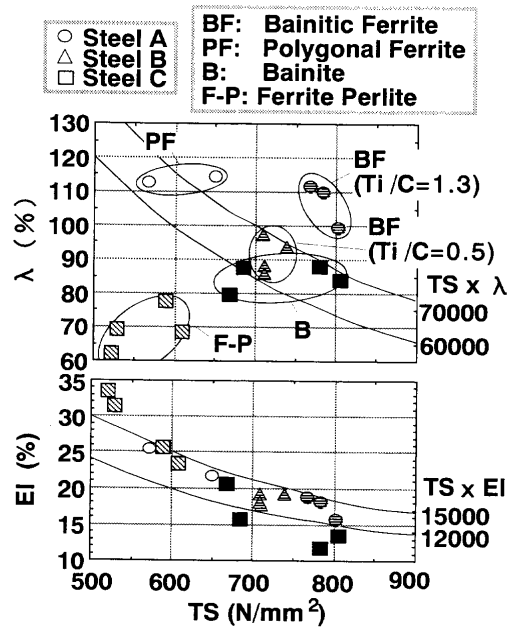


Fig. 6. Effect of microstructures on TS- $\lambda$  balance and TS-EI balance.

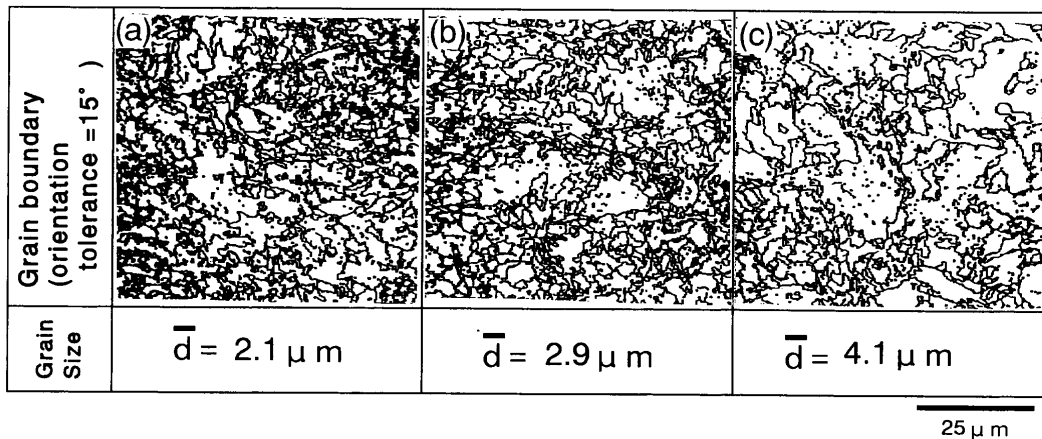


Fig. 5. Grain size of sheet steels of FDT (a) 860°C, (b) 880°C, and (c) 910°C.

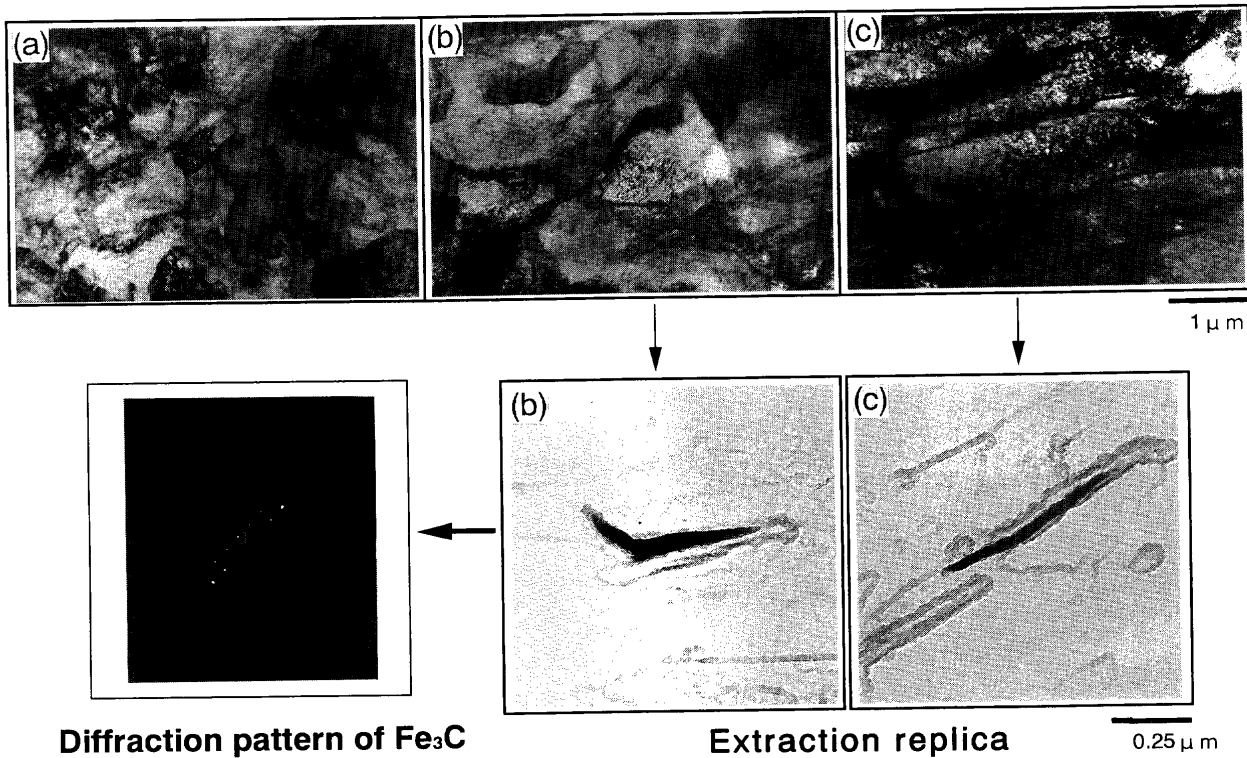


Fig. 7. Transmission electron microstructures of bainitic ferrite and bainite (a) bainitic ferrite (Ti/C=1.3), (b) bainitic ferrite (Ti/C=0.5), and (c) bainite.

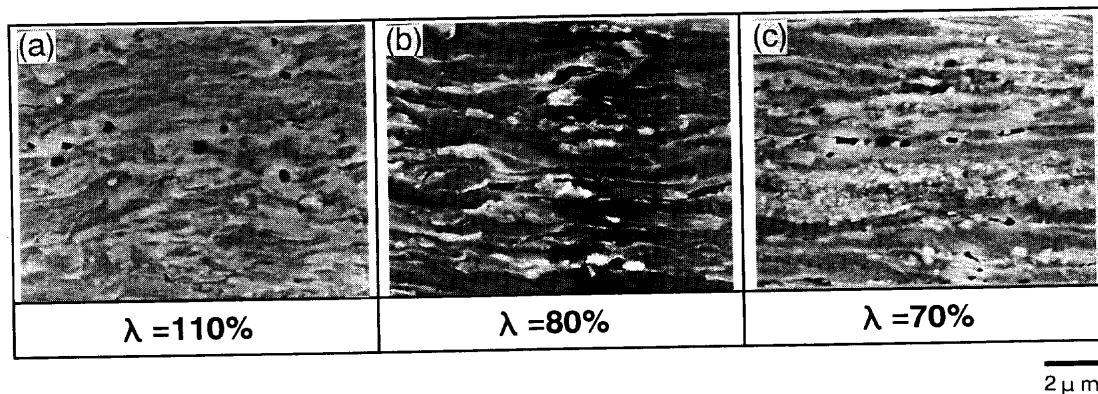


Fig. 8. Scanning electron micrographs of (a) bainitic ferrite, (b) bainite, and (c) ferrite-perlite steels after stretch-flange deformation.

らずλ値に差が認められる。EIについては、700 N/mm<sup>2</sup>以上ではベイニティック・フェライト組織がベイナイト単相組織よりおよそ5%程度高くなっている。上述のように組織およびTi/C原子当量比によってTS-λバランスが大きく異なっていることがわかる。

#### 4.2 炭化物の影響

従来より、λ値に影響する因子としては、大きな非金属介在物の影響<sup>14,15)</sup>や、セメンタイトなどの炭化物の影響<sup>16,17)</sup>が報告されている。ただし、今回の実験では真空溶解材を用いていることやS量も低く抑えていることなどにより、非金属介在物の影響は小さいと考えられる。従って、λ値への影響はセメンタイトの有無の影響が最も大きいと考えられる。Fig. 7にはTi/Cが1.3のベイニティック・

フェライト単相組織、Ti/Cが0.5のベイニティック・フェライト単相およびベイナイト単相組織のTEM組織と、レプリカ法による炭化物の電子顕微鏡写真を示す。Ti/Cが1.3のベイニティック・フェライト単相組織ではセメンタイトが認められないが、Ti/Cが0.5のベイニティック・フェライト単相組織やベイナイト単相組織には、セルの界面やラス間にセメンタイトが認められる。また、Fig. 8にはこれらの試料の打ち抜き穴広げを行った後の加工先端部のSEM観察の結果を示す。セメンタイトのないベイニティック・フェライト単相組織では特定のボイドの起点が認められないのに対して、ベイナイト単相組織やフェライト・パーライト組織ではセメンタイトの界面よりボイドが発生していることがわかる。すなわち、フェライト・パー

ライト組織はもちろん、ベイナイト単相組織およびTi/C=0.5のベイニティック・フェライト単相組織よりも、Ti/C=1.3のベイニティック・フェライト単相組織のλ値が高い理由は、ボイド発生の起点となる組織内のセメントライトが存在しないためと考えられる。

#### 4.3 析出物の影響

鋼Aでは550°C巻取温度で急激にλ値の低下する特異な現象が認められた。この温度付近では、ポリゴナル・フェライトとベイニティック・フェライト組織の混合組織であること、またTiC析出のノーズがあることから、複合組織と同様の組織の不均一性によって<sup>6-9)</sup> λ値が低下したことや、TiCの整合析出がマトリックスの延性を低下させて<sup>18)</sup>、λ値を低下させたことなどが考えられる。しかし、600°Cの巻取において、組織がポリゴナル・フェライトとベイニティック・フェライト組織の混合組織であったにもかかわらずλ値の低下が少ないことから、TiC析出が主な原因と推察される。このことをさらに確認するために、Fig. 9に

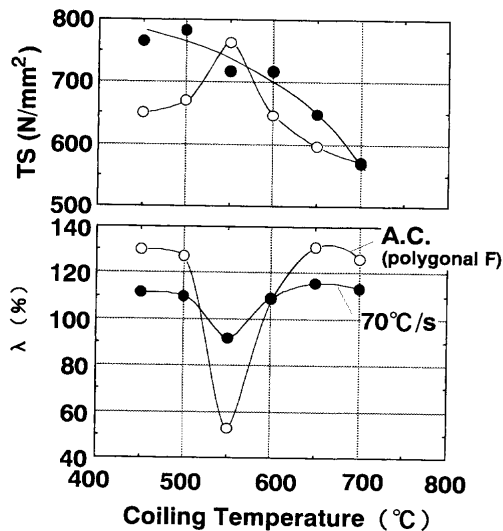


Fig. 9. Effect of cooling rate after hot rolling on TS and λ value of steel A.

鋼Aを用いて熱延後70°C/sで冷却した場合の結果に加えて、熱延直後に空冷する熱延条件により母相の組織をポリゴナル・フェライト単相組織に統一し、組織因子の影響を除いた場合のTSとλ値の結果を示す。またFig.10には450°Cおよび550°Cの巻取におけるTiCの析出状況も示す。TiCの析出物は550°Cにて多く認められ、ポリゴナル・フェライト単相組織の場合でも550°Cの温度でλ値の低下が認められた。つまり、λ値の低下は組織の影響ではなく、この温度で多く整合析出したTiCによるものと考えられる。

#### 4.4 結晶粒径の影響

安原らは、組織を微細化とすることで伸びフランジ性が向上する可能性を示している<sup>19)</sup>。また、忝倉らは微細粒とすることで、TSが増加するにもかかわらず、局部伸びがほとんど変化しない、すなわち組織の微細化によりTS-λバランスが向上する可能性を示唆する結果を示している<sup>20)</sup>。しかし、これまで炭化物のないベイニティック・フェライト組織のような変態組織を結晶粒径の概念で定量化してλ値との関係を議論した例はない。すでに仕上温度を変化させた場合について、TSおよびλ値、またEBSPにて15°以上の結晶方位差を持つ結晶粒を観察した結果をFig. 4やFig. 5に示した。これらの結果を含めて、結晶粒径とλ値の関係をFig.11に示す。図中には未再結晶γ域での圧下量を変化させて、さらに結晶粒径を細かく変化させた結果も含めている。仕上温度を低くすることや、未再結晶γ域での圧下量を増加することによって結晶粒径が小さくなり、それにとまってλ値も向上する。局部伸びとの対応については、そのバラツキが大きく、λ値との明確な関係を示すことができなかった。

ベイニティック・フェライト組織を微細化した場合には、変形中に局部的にひずみが集中することを抑えて、局所的なボイドの生成や連結を抑えているものと推察される。

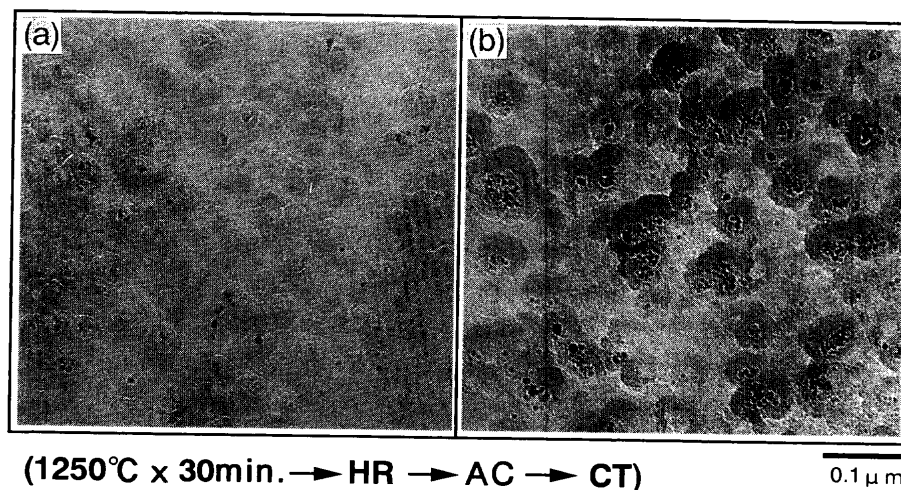


Fig. 10. TiC precipitate of steel A at (a) CT450°C and (b) CT550°C.

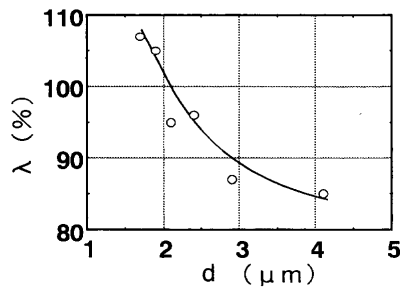


Fig. 11. Effect of grain size on  $\lambda$  value.

## 5. 結言

低C-Ti添加高強度熱延鋼板の伸びフランジ性について検討した結果、780 N/mm<sup>2</sup>級の強度において $\lambda$ 値が高いほうから、ベイニティック・フェライト単相組織 (Ti/C=1.3) > ベイニティック・フェライト単相組織 (Ti/C=0.5) > ベイナイト単相組織の順であった。さらに、これら組織の伸びフランジ性の違いについて、以下の冶金的因子の影響を明確にすることができた。

(1) Ti/C=0.5のベイニティック・フェライト組織や、ベイナイト単相組織では、組織内にセメンタイトが存在しており、このセメンタイトがポイド発生の起点となるために、Ti/C=1.3のベイニティック・フェライト組織と比較してTS- $\lambda$ バランスが低い。

(2) 低C-Ti添加鋼においては550°C巻取温度において微細TiCが多く析出する。そして、このTiC析出は伸びフランジ性を劣化させる。

(3) ベイニティック・フェライト組織において、仕上温度を低く (FDT850°C) することや、未再結晶 $\gamma$ 域の圧下率を増すことにより組織を細粒化させた結果、細粒化によって伸びフランジ性が向上することがわかった。

## 文 献

- 1) S.Nomura, Y.Nakazawa, S.Nakai and N.Mizui: *Sumitomo Met.*, **48** (1996), 132.
- 2) M.Morita, N.Kurosawa and N.Aoyagi: *Kawasaki Steel Tech. Rep.*, **27** (1995), 182.
- 3) O.Kawano, K.Esaka, S.Kato, H.Abe, J.Wakita, M.Takahashi, M.Katakami and S.Harada: *Seitetsu Kenkyu*, **329** (1988), 15.
- 4) S.Hashimoto: *J. Soc. Automot. Eng. Jpn.*, **54** (2000) Jan., 39.
- 5) Y.Murakami, N.Yamaguchi, S.Kishita, T.Hayashi and Y.Onda: *J. Soc. Automot. Eng. Jpn.*, **53** (1999) Dec., 77.
- 6) M.Kinoshita, H.Kimura, K.Osawa, T.Okita, H.Owada and M.Hori: *NKK Tech. Rep.*, **145** (1994), 1.
- 7) M.Sudo and T.Iwai: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), 1185.
- 8) M.Sudo, S.Hashimoto and S.Kambe: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), 1211.
- 9) S.Hanai, K.Watanabe and K.Esaka: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), 1306.
- 10) J.Jizaimaru and Y.Takahashi: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), 1333.
- 11) T.Kashima, I.Tsukatani, T.Soshiroda and Y.Okano: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 404.
- 12) T.Kashima and S.Hashimoto: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 1220.
- 13) 鋼のベイナイト写真集I, 日本鉄鋼協会, 東京, (1992), 4.
- 14) H.Kobayashi: *SAE Tech. Pap. Ser.*, #982372, (1998).
- 15) K.Misonoh, T.Fujii, R.Fukumoto and A.Nakajima: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), 147.
- 16) T.Yamaguchi and H.Taniguchi: *NKK Tech. Rep.*, **45** (1969), 24.
- 17) N.Matsuzo, A.Itami and K.Koyama: *SAE Tech. Pap. Ser.*, #910513, (1991).
- 18) K.Kunishige, N.Nagao, T.Matsuoka and S.Hamamatsu: *Tetsu-to-Hagané*, **71** (1985), 1140.
- 19) H.Yasuhara, K.Okuda, A.Tosaka and O.Furukimi: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 1219.
- 20) N.Matsukura and S.Namba: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 373.