

高強度パイプ型ドアビームの開発

Development of High-strength Pipe Door Beam

町 田 功*	山 田 嘉 嗣*	成 田 正 幸*
Isao Machida	Yoshiji Yamada	Masayuki Narita
山 本 武*	管 間 高 之*	
Takeshi Yamamoto	Takayuki Sugama	

要 旨

本開発では、ドアビーム本来の機能を損なう事なく軽量化が図れる高強度パイプ型ドアビームを、材料仕様と熱処理強化技術の最適な組合せにより開発した。

(1) ストレート形状品の材料仕様は、電気抵抗溶接鋼管を基本に、溶接性を考慮し、かつ高周波誘導加熱による熱処理強化が可能な、0.2C-0.1Si-0.7Mn-0.3Cr-Ti-B 系成分仕様を設定した。その結果、従来の 1180N/mm² 級ハット型ドアビームに対し約 2kg/本の軽量化を図った 1470N/mm² 級パイプ型ドアビームを開発した。

(2) スペース・レイアウトを考慮した異形断面形状品や弓型湾曲形状品等の熱処理方法としては、電気抵抗加熱方式が適している。この場合、結晶粒粗大化が懸念されるため、基本成分系に Nb を添加する事が有効である。

ABSTRACT

A lightweight yet high-strength door beam which retains the fundamental functions of the door beam was developed with a combination of an optimum material specification and heat-treatment reinforcing techniques. For the straight shaped pipe, an electric resistance welding steel pipe which accommodates conditions for weldability and heat treatment reinforcement under high-frequency inductance heat was studied. The result was the selection of material 0.2C-0.1Si-0.7Mn-0.3Cr-Ti-B.

This led to the development of pipe door beam withstanding 1470 N/mm², which saves 2 kg a pipe from the conventional hut-shape door beam withstanding 1180 N/mm². For door beams with unique-shape section and bow-shape twisting contour, which are used for space layout, the suitable heat treatment was the electric resistance method. To counter the problem of enlarged crystallization peculiar to this method, Nb was added to the basic ingredients.

1. ま え が き

近年、世界的に乗員保護を目的とした車体安全性が注目されており、各自動車メーカーとも車体安全技術の開発が推進されている。一方、環境問題への対応として、燃費改善等を目的とした車体の軽量化ニーズが高まっている。

当社では、既にハット型ドアビーム (1180 N/mm² 級高張力鋼板: プレス成形品) を採用し、側面衝突安全性を左右するサイド・ドア強度を確保しているが、従来構造のまま更に軽量化を図るために素材の高強度化を行うと、プレス成形性、溶接性等生産技術面での対応が困難である。

そこで、ドアビーム本来の機能を損なう事なく、軽量コンパクト化を図る検討を行った結果、Table 1 に示す

ようなパイプ形状を基本に、熱処理強化を組合わせた高強度パイプ型ドアビームを開発し、大幅な軽量化を達成した。

本稿では、溶接性と焼入性という相反する特性をバランスさせた材料仕様、形状面での軽量化検討、ドアビームの利用技術について報告する。

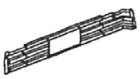
2. 材 料 仕 様

本開発材に要求される材料特性は、溶接性を保持しつつ高強度化する事である。一般的に C 量の低減化は、溶接性に対し有効であるが強度は逆に低下するため、別途高強度化手法が必要となる。

そこで本開発では、低 C 材に焼入性向上元素を添加し、更に急熱急冷処理を施す事により高強度化を達成した。

* 栃木研究所

Table 1 Constructional feature of conventional and developing products

	Conventional products Hat type	Developing products Pipe type
Tensile strength	1 1 8 0 N/mm ²	1 4 7 0 N/mm ²
Weight	4. 0 kg/piece	2. 0 kg/piece
Appearance		
Sectional shape		

尚、熱処理方案はドアビームが単純なストレート形状のため、熱処理設備を含めた生産性やコストの点から Fig. 1 に示す高周波誘導加熱焼入れを採用した。以下、上記技術概要について報告する。

2.1. 成分設計の考え方

溶接性を保持しつつ強度をあげるため、両者にとって重要な C 量の設定を行った。SAE J417B の硬度換算表によると、ピッカース硬度 (HV) と引張強度 (TS) の関係は HV 360~520 の範囲内で次式が成立する。¹⁾

$$TS(N/mm^2) = 4.09 \times HV - 344 \quad \cdots (1)$$

(1)式より、要求される TS=1470 を得るために必要な最高硬度は HV = 444 となる。

また、C 量と硬度の関係として次式が成立する。

$$HV(99.9\% \text{ マルテンサイト}) = 909 \times \%C + 285 \quad \cdots (2)$$

$$HV(95.0\% \text{ マルテンサイト}) = 857 \times \%C + 255 \quad \cdots (3)$$

ここで、高周波誘導加熱焼入れではマルテンサイト化率 95.0% 以上が期待できることから、(3)式より最高硬度 HV = 444 を得る為に必要な C 量は約 0.22% となる。

次に、Si・Mn・Cr の添加効果について検討した。3 元素とも高温状態にてオーステナイト相を熱的に安定化させ、焼入性を向上させる元素であり、影響力は Mn>Cr>Si の順に強い。しかし、その効果を十分に発揮させるには多量添加が必要であるため、溶接性を阻害する恐れがある。

ドアビームを実車に取付けるブラケットを溶接する場合の溶接方案・溶接条件等を前提とし、溶接部の健全性

Table 2 Chemical composition of developing material (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	B
0.22	0.18	0.70	0.016	0.004	0.34	0.028	0.0018

が確保できるような成分設計が重要である。従って、本開発では日本溶接協会規格の WES 3001 による PCM(溶接割れ感受性組成) ≤ 0.3 を目標に上記元素の添加量を制限し、それぞれ設定した。また、上記元素の添加量制限に伴う焼入性不足を補うため、B を適量添加した。

B はオーステナイト粒界に固溶状態で偏析し、粒界に於ける界面エネルギーを低下させ、オーステナイト→フェライト変態時の核生成を遅延させる事によって焼入性を高める元素である。しかも、微量添加で大きな効果があり、溶接性に対しても有効である。尚、B を添加しても BN 等の形で析出するとその効果が無くなるので、B を固溶状態で確保するために B よりも N との親和力の強い Ti を適量添加した。

以上より設定した化学成分を Table 2 に示す。

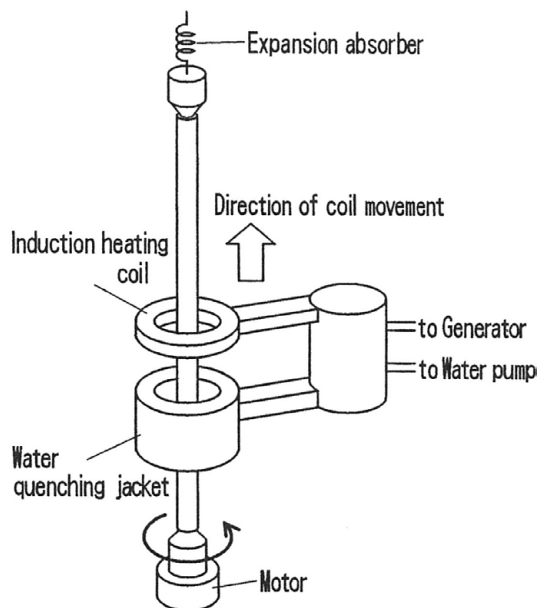


Fig. 1 Device of induction hardening

2.2. 効果確認結果

B 添加による焼入性効果については、その指標として Hollomon&Jaffe 法による理想臨界直径 (DI 値) での計算予測を行った上で、JIS G0561 によるジョミニ試験にて効果確認を実施した。DI 値は Fig. 2 に示すようにオーステナイト結晶粒度依存性があり、B 添加により約 2 倍の値を得られると予測される。この効果を確認したジョミニ試験の結果 (Fig. 3 参照)、95.0% マルテンサイト時に於ける焼入深さは、B 添加により約 1.5 倍となる事が確認された。

次に、パイプ実体での熱処理品質確認結果を Fig. 4 に示す。図に示すように、加熱条件及び冷却条件の適正化を図る事により、95.0% 以上の高マルテンサイト化率を

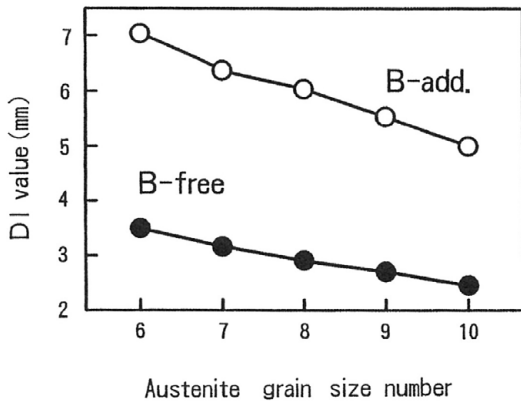


Fig. 2 Effect of admixing B on DI value

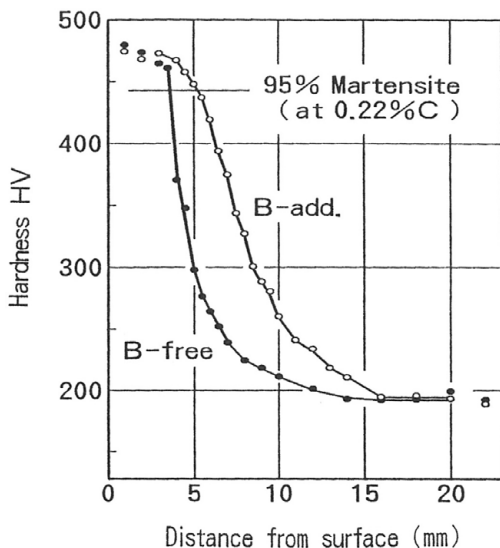


Fig. 3 Effect of admixing B on Jominy curve

安定して得られる事が確認された。

参考として、パイプ型ドアビームの熱処理後の工程を考えた場合、車体取付け後、電着塗装工程に於て比較的低温ではあるが加熱されるため、機械的性質の変化が予想される。そこで、高周波誘導加熱焼入材を 200~450℃ に加熱後大気放冷し、その機械的性質を確認した (Fig. 5)。この結果より、比較的低温な加熱条件に於ても引張強度及び降伏点が変化する事が確認された。従って、車体取付け後の強度保証を考えた場合、この変動分を見込んだ単品強度を設定するか、予め焼入れ後に低温処理を施す等の品質管理が必要である。

以上より、ストレート形状品の材料仕様を確立し、熱処理強化技術との組合せによりパイプ実体にて目標強度

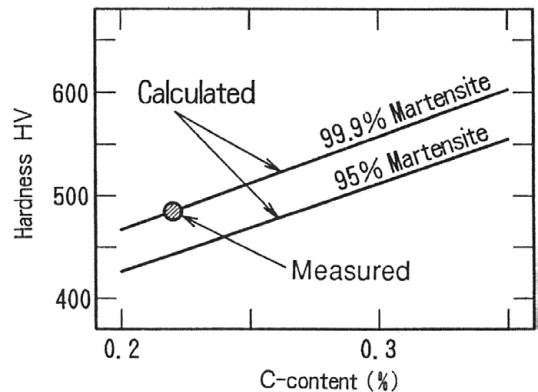


Fig. 4 Relationship of C-content vs heat treatment hardness

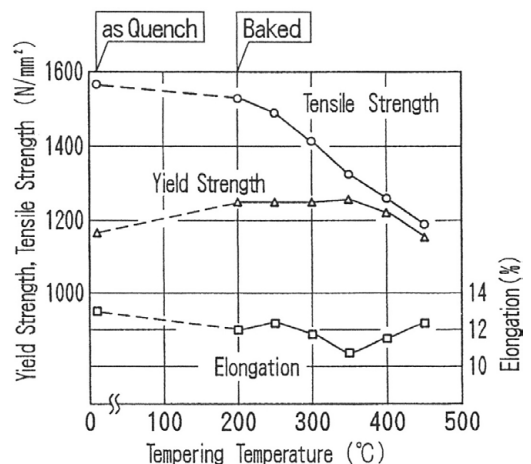


Fig. 5 Relationship of tempering temperature vs mechanical properties

Table 3 Elongation and flatness by material reduction method

	Elongation	Flatness
Drawing	12.0%	0.78 H/D
Swaging	18.0%	0.34 H/D

を得る事ができた。また、このパイプ型ドアビームは従来のハット型ドアビームに対し、1本当たり約1.7kgの軽量化を達成した。

3. 形状面での軽量化検討

車体構造上、側面衝突時の最大曲げモーメントが負荷される部位はドアビーム中央部である。従って、ドアビームの機能としては、強度に影響しない範囲内であれば端末部の減肉（軽量化）は可能であり、加工方法としては引き抜き加工やスウェーjing加工等が挙げられる（Fig. 6 参照）。図に示すように、前者がワークに芯金

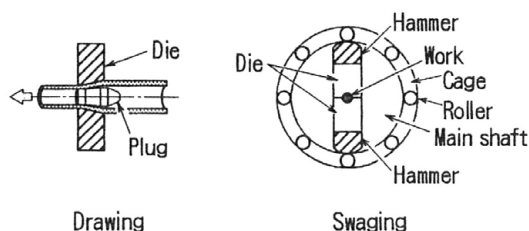


Fig. 6 Drawing and swaging

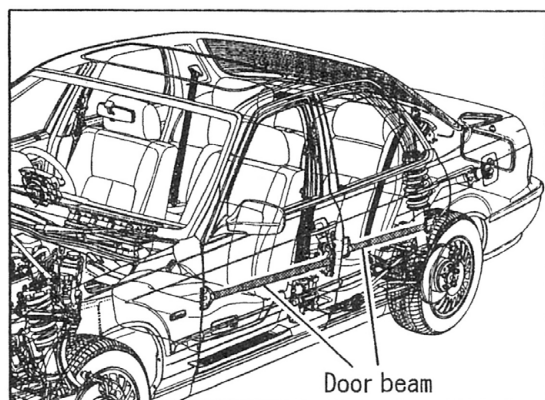


Fig. 7 Door beam positioned in vehicle

を挿入して固定したダイスの間を通すのに対し、後者はワークに芯金を挿入し、ワークを高速で回転させながら前進させ、ワーク軸垂直方向からダイスで挟み圧縮して減肉させる加工方法である。

また、スウェーjing加工方法は加工部に圧縮残留応力を付与するという特徴をっており、引張残留応力を付与する引き抜き加工と比較して、加工後の伸び及び偏平性に有利（Table 3 参照）である。

以上より、本開発ではスウェーjing加工を採用し、ストレート形状品比較でドアビーム1本当たり約0.3kgの軽量化を達成した。

4. 実車適合性(FMVSSテスト)

4.1. テスト方法

ドアビームの実車取付け位置をFig. 7に示す。北米安全規格による実車サイドドア強度テスト(FMVSS214)は、Fig. 8に示すように、車体側方からドアのほぼ中央部をR152.4 mmの硬鉄製の半円筒にて荷重を加え、荷重と変位を測定するもので、その変位曲線から初期抵抗・中間抵抗・ピーク荷重をそれぞれ求める。

4.2. テスト結果

荷重－変位線図をFig. 9に示す。図に示すように、本開発品は従来のハット型ドアビームに対して同等以上の実力を示し、FMVSSテスト要件も満足した。

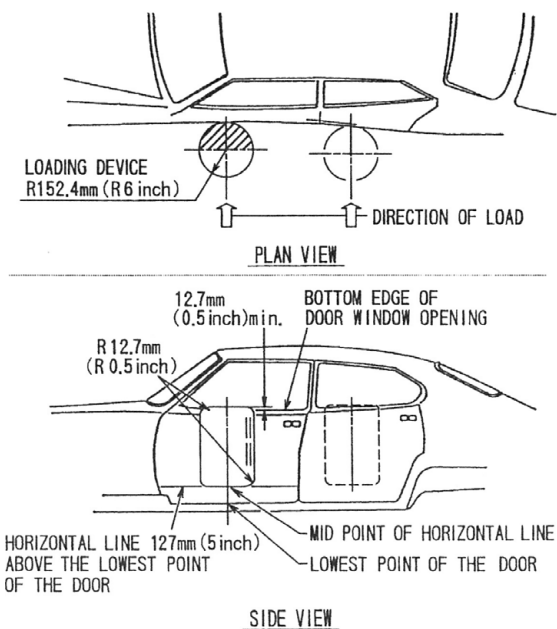


Fig. 8 Testing method on FMVSS 214

5. ドアビームの利用技術

パイプ型ドアビームの軽量化及び機能向上を考えた場合、パイプ外径を大きくする事は断面係数の増加につながるため、曲げ剛性には有効である。

しかし、ドアの内部には多数の部品があり、パイプ外径を大きくするとこれらとの干渉が予測される。そこで、ドア内部のスペース・レイアウトについて検討を行った結果、Fig. 10 に示すようにパイプ両端末の偏平化、ドアビーム形状の弓型湾曲化等により対応が可能である。

上記の末端偏平化等の異形断面形状や弓型湾曲形状のドアビームに対して、前述の高周波誘導加熱方式による移動焼入れは、熱処理条件の制御が困難である。そこで、上記形状に対応する熱処理方案としては電気抵抗加熱焼入れが適当である。

5.1. テスト方法

Fig. 11 に示すような縦型電気抵抗加熱焼入れ装置を用いて熱処理テストを行う。この装置の原理は、クランプ電極にて直接通電を行い、ビーム全体が均熱された後クランプを解除し、冷却水槽中に自重落下させる方式のものである。

5.2. テスト結果

熱処理テストの結果、焼入れ時の加熱条件の調整により、熱処理強度は確保できた。しかし、熱処理歪による変形(反り)は高周波誘導加熱方式に対し約5倍と大きく、低温衝撃特性も低下した。

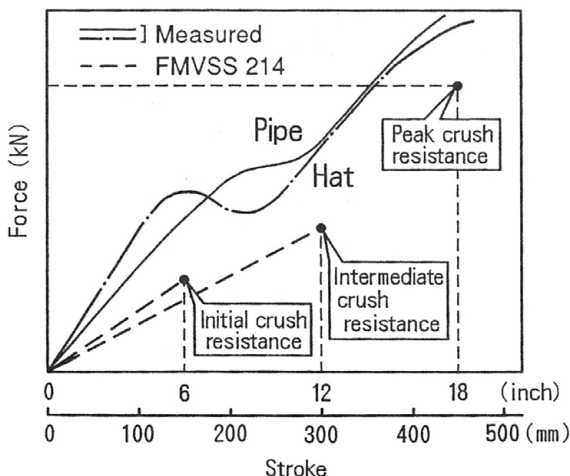


Fig. 9 Strength testing results of side door on vehicle

ここで、熱処理歪に関しては矯正焼入れ、冷却条件変更等にて対応可能であるので、低温衝撃特性について検討した。

5.3. 低温衝撃特性の低下原因とその対応

2mmV ノッチを施した試験片を用いて簡易シャルピー試験を行った結果、Fig. 12 に示すように破面遷移温度(vTs : 脆性破面率 = 50% 時の温度)は -50°C であり、高周波誘導加熱焼入れのそれ(-100°C)よりも高く低温衝撃特性が劣る事が確認された。

上記特性の低下原因を究明するため、高周波誘導加熱焼入れ材と電気抵抗加熱焼入れ材のオーステナイト結晶粒度を測定した。その結果、Fig. 13 に示すように前者が

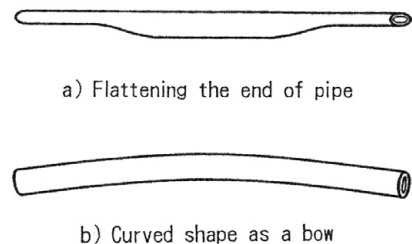


Fig. 10 Examples of applying space efficiency

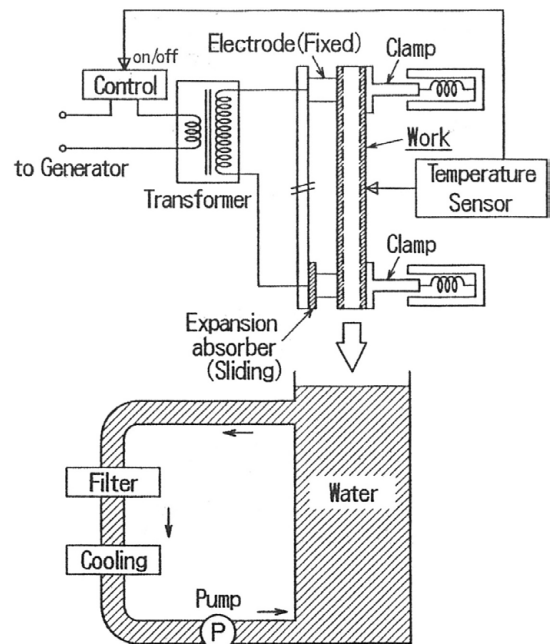


Fig. 11 Device of electric resistance hardening

Table 4 Chemical composition of Nb admixed material (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Nb	Ti	B
0.21	0.15	0.72	0.015	0.004	0.31	0.026	0.031	0.0019

粒度 No.12 と細粒であるのに対し、後者は粒度 No.6~7 と粗大化しており、後者の破面遷移温度が上昇したのはこのためと推定される。また、結晶粒粗大化の原因としては、前者の移動焼入れに対して後者は全体加熱焼入れであり、入熱量が大きく結晶粒成長を助長したためと推定される。

そこで、高温下に於ける結晶粒粗大化防止の観点から Nb を適量添加した。Nb は固溶温度の高い微細な NbC として結晶粒界に析出し、結晶粒成長を抑制するピン止め効果をもつ元素である。この効果を確認するため、

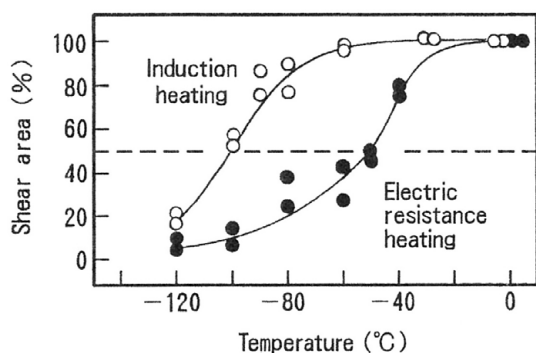
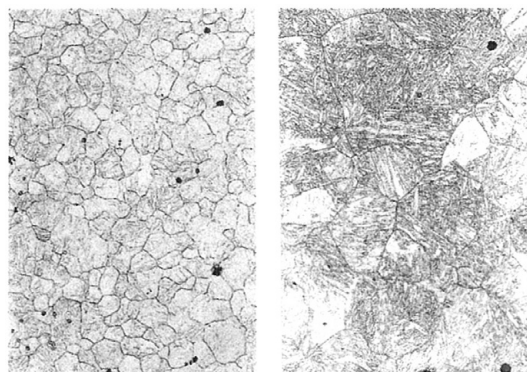


Fig. 12 Effect of hardening method on transition temperature (Nb-free)



a) Induction heating b) Electric resistance heating

Fig. 13 Comparison of Austenite grain size

Nb 添加の有無による焼入温度と結晶粒度の関係を Fig. 14 に示す。その結果、Nb を適量添加する事により結晶粒の粗大化を抑制できる事が確認された。また、Nb 添加の有無による vT_s への影響を Fig. 15 に示す。図に示すように、Nb を添加する事で、 vT_s は -50°C から -120°C へと低温側へ移行する事が確認された。

以上より、Table 4 に示す Nb 添加鋼の材料成分仕様を設定した。

尚、シャルピー試験の場合パイプ実体と比較して切欠き効果等により、より厳しい評価と推測されるため、パイプ実体での低温落重試験を行った。その結果、衝撃荷重を与えてもパイプが塑性変形し破断には至らない事が確認された。従って、パイプ形状では割れに対する感受性は鈍化する傾向にあると考えられるが、前述の低温衝撃特性には十分な配慮が必要である。

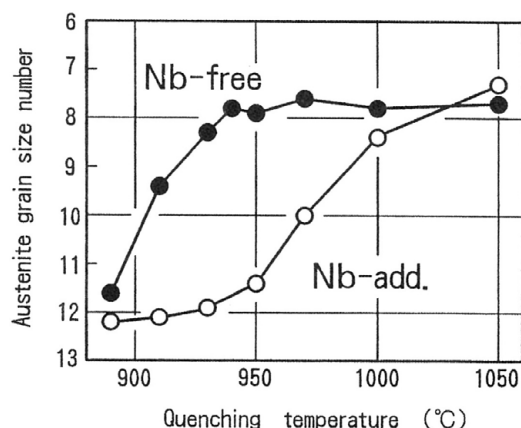


Fig. 14 Relationship of quenching temperature vs Austenite grain size number

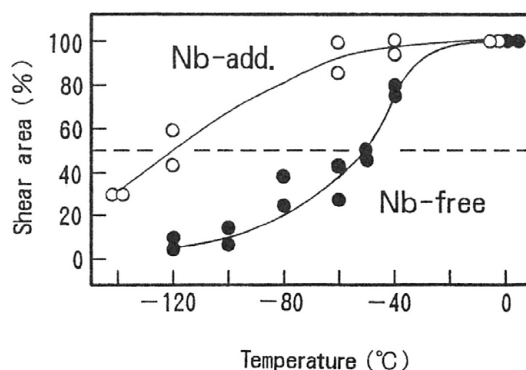


Fig. 15 Effect of admixing Nb on transition temperature (Electric resistance heating)

6. ま と め

従来のハット型ドアビームと比較して、エネルギー吸収特性に優れた高強度パイプ型ドアビームを開発し、軽量化を達成した。

ここでは、高強度化を図るための熱処理強化技術を含めた材料仕様の概要について示した。

(1) 溶接性を考慮し、かつ高周波誘導加熱による熱処理強化が可能な、0.2C-0.1Si-0.7Mn-0.3Cr-Ti-B 系電気抵抗熱処理鋼管の材料仕様を設定した。その結果、従来型ドアビームに対し約 25% の高強度化が図れ、更にスウェーjing加工の効果と合わせて、ドアビーム 1 本当り約 2 kg の軽量化を達成した。

(2) スペース・レイアウトを考慮した異形断面形状品や弓型湾曲形状品等の場合、熱処理方法としては電気抵

抗加熱焼入れが適している。この場合、焼入れ時の入熱量増加に伴う結晶粒粗大化のため、低温衝撃特性の悪化が考えられるので、基本成分系に Nb を添加する事が有効である。

7. 謝 辞

本開発の量産化にあたり、ご協力を頂いた新日本製鉄(株)、住友金属工業(株)、その他社内外の多くの関係者の方々に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Metals Handbook Ninth Edition, Volume 1
Properties and Selection: Irons and Steels

■著 者■



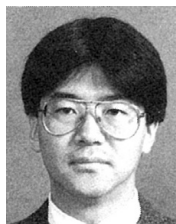
町 田 功



山 田 嘉 嗣



成 田 正 幸



山 本 武



管 間 高 之