

## 技術資料

## 自動車用980MPa級高強度薄肉電縫鋼管

松元 孝\* 児玉真一\*\* 面迫浩次\*\*\* 近藤敏洋\*\*

High Strength Thin Walled ERW Steel Tubes with Tensile Strength of 980MPa for Automotive Use.

Takashi Matsumoto, Shinichi Kodama, Kouji Omosako, Toshihiro Kondou

## Synopsis :

Steel sheets, especially in the case of automotive usage, were required to have high strength with thinner gauge for the purpose of weight reduction of car body from the viewpoint of global environmental problems including reduction of CO<sub>2</sub> emission. It has been well known that solid-solution strengthening, precipitation-work hardening, grain-refining hardening and transformation-microstructure strengthening such as DP and TRIP steels were much effective techniques to enhance the strength and toughness.

This paper described a laboratory investigation with respect to application of precipitation-work hardened steel and TRIP steel to high strength thin walled ERW steel tubes having a maximum tensile strength of 980 MPa grade.

The use of precipitation-work hardened steel seemed to be very efficient in obtaining desirable strength easily and economically without increase in cost. Otherwise the use of TRIP steel seemed to be very effective for getting excellent formability.

In addition, various properties of the manufactured trials such as static bending characteristics, results of dynamic axial collapse test, fatigue properties and so on were introduced.

## 1. 緒言

近年、地球環境保護の観点から、地球温暖化の原因となるCO<sub>2</sub>排出量の削減が強く求められており、車体の軽量化による燃費向上が進められている。

一方、自動車衝突時の安全基準が厳格化したことから、衝突安全性向上への要求が高まっており、クラッシュボックス<sup>1)</sup>などの緩衝部材や補強部材の適用により車体重量は増加する傾向にある。この衝突安全性と上述の車体の軽量化を両立する手段として高強度薄鋼板の適用が進んでいる。

例えば、Si, Mn, Pなどを添加してフェライト地を強化した固溶強化型鋼板<sup>2)</sup>、冷間圧延や調質圧延により導入される転位をそのまま素材強化に活用する加工（転位）強化型鋼板<sup>3)</sup>、DP鋼<sup>4)</sup>やTRIP鋼<sup>5)</sup>に代表される、

軟質なフェライトや残留オーステナイトと硬質なマルテンサイトやベイナイトのうち2種以上の複合マイクロ組織で構成される変態組織強化型鋼板、HSLA鋼<sup>6)</sup>に代表されるように、C-(Si)-Mn系の単純系鋼にNbやTiなどの炭窒化物形成元素を微量添加した析出強化型鋼板である。

ところで、管材を素材としたさまざまな形状の薄肉中空製品は、剛性が高いこと、および板材や棒鋼からの軽量化が可能であるという特徴から、自動車などの構造用鋼管<sup>7)</sup>として広く使用されている。これらの薄肉中空製品においても、最近、地球環境問題への対応の観点からさらなる軽量化が要望され、素材には780MPa級以上の高強度化が要求され始めている。

本稿では、590MPa級析出強化型熱延鋼板を加工強化した鋼板<sup>3)</sup>およびSi, Mn添加の中炭素系TRIP鋼を素材に980MPa級電縫鋼管を実機試作し、それらの諸特性

\*技術研究所 鋼材研究部 鋼材第一研究チーム チームリーダー \*\*技術研究所 鋼材研究部 鋼材第一研究チーム  
 \*\*\*技術研究所 鋼材研究部 鋼材第二研究チーム 主任研究員

について述べる。

## 2. 実機製造プロセスおよび製造条件の概要

実機製造材の化学成分の一例を表1に示す。No.1鋼は、加工強化型鋼板素材の980MPa級電縫鋼管、No.2鋼

表1 実機製造の薄肉電縫鋼管の化学成分例

No.	C	Si	Mn	Ti+Nb
1	0.12	0.1	1.6	0.05
2	0.17	1.3	2.4	tr

はTRIP鋼素材の電縫鋼管である。前者では、通常の熱間圧延および酸洗を行ったTi、Nb複合添加の590MPa級熱延鋼板を用いて、圧延率65%の冷間圧延を施し、その圧延まま鋼板を素材に、肉厚1.0mm、外径寸法38.1mmの電縫鋼管を製造した。また、後者については、Si、Mn添加の中炭素系熱延鋼板を用いて、圧延率50%で冷間圧延を施し、引き続き、850℃の連続焼鈍（オーステンパー温度：400℃）を行った焼鈍板を素材に、同様の寸法の電縫鋼管を製造した。

図1に電縫鋼管のミクロ組織を示す。No.1鋼は圧延まま鋼板を素材にしているため、冷延にて伸展したフェライトと微細炭化物の均質な繊維状の加工組織を呈していた。No.2鋼はフェライトと第2相（ベイナイト主体、一部マルテンサイトおよび残留オーステナイト）から成る複合組織を呈していた。

なお、No.1鋼は、主に直管での使用を前提とした安価な一般加工用電縫鋼管を、No.2鋼は、高加工用電縫

鋼管を提供することを目的とした。

## 3. 980MPa級高強度電縫鋼管の諸特性

### 3.1 機械的性質と付帯特性

表2に電縫鋼管の機械的性質の一例を示す。No.1鋼は、降伏応力（以下、YSと記す）が約890MPa、引張強

表2 電縫鋼管の機械的性質および付帯特性

No.	肉厚 /mm	YS /MPa	TS /MPa	T.El /%	拡管比	へん平試験	
						Aへん平	Bへん平
1	1.0	890	1010	6	1.1	2/3D <sub>0</sub>	2/3D <sub>0</sub>
2		810	1070	23	1.2	2/5D <sub>0</sub>	2/5D <sub>0</sub>

さ（以下、TSと記す）が約1010MPa、全伸び（以下、T.Elと記す）が6%であり、拡管試験<sup>3)</sup>では1.1D<sub>0</sub>まで拡管可能であった。へん平試験<sup>3)</sup>は、溶接ビード部を0°位置に設定するAへん平、溶接ビード部を90°位置とするBへん平いずれも2/3D<sub>0</sub>であった。No.2鋼は、YSが約810MPa、TSが約1070MPa、T.Elが23%であり、拡管試験では1.2D<sub>0</sub>まで拡管可能であった。へん平試験は、密着まではいかないが、いずれも2/5D<sub>0</sub>であった。No.1鋼は、圧延まま鋼板を素材に電縫鋼管を製造したものであり、圧延時の塑性ひずみが残存しているため、No.2鋼と比較して延性が劣っている。しかし、降伏比が約89%という特徴から、高降伏比型の電縫鋼管に適用可能と考える。一方、No.2鋼は、約75%の低い降伏比であり、上述したように加工性に優れていることから、拡管や縮管、さらには曲げ加工などの二次加工を施す電縫鋼管に適用

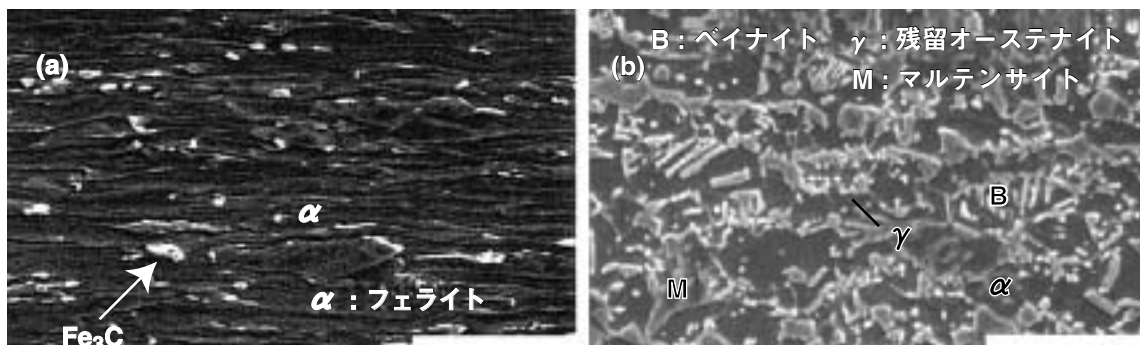


図1 電縫鋼管のミクロ組織 (a)No.1鋼 (b)No.2鋼

Fig.1 Comparison of microstructures between No.1 and No.2 ERW steel tubes.

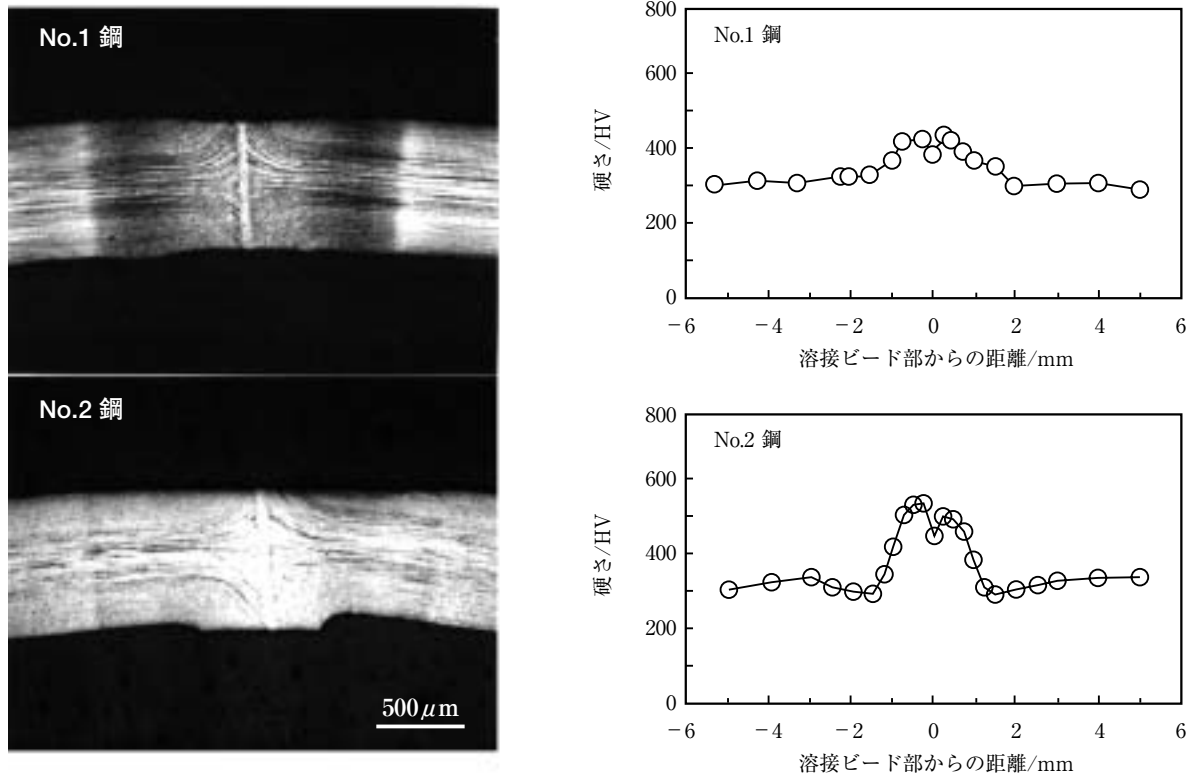


図2 実機試作の電縫鋼管溶接部のメタルフローおよび溶接ビード近傍の硬さ変化

Fig. 2 Observation of metal flow and comparison of hardness distribution in the vicinity of welded seam for No.1 and No.2 ERW steel tubes.

可能と考える。なお、No.2鋼は残留オーステナイト約9%のTRIP鋼が素材であるが、電縫鋼管製造時に残留オーステナイトはほとんど加工誘起変態した。

図2に溶接部のメタルフローと硬さ分布の一例を示す。メタルフローの観察結果より、通常材と同様にその健全性が確認された。このことから、圧延まま鋼板およびTRIP鋼を素材に電縫鋼管を製造することに対して大きな製造上の技術課題がないものと判断された。硬さについては、No.1鋼の場合、最軟化点は認められず、Ti, Nb複合添加の効果が現れたものと推察される。No.2鋼の場合、溶接中心部から約1.5mm離れた箇所以最軟化点が存在するが、硬さの低下割合は約30HVと非常に小さいものであった。

### 3.2 静的曲げおよび軸圧縮特性

図3に先端半径150mmRの押込み治具を用いて押込み速度0.3mm/sで実施した静的三点曲げ試験結果を示す。なお、電縫鋼管の長さは800mmであり、曲げスパン（支持間隔）は585mm、溶接ビード部位置は0°（曲げ用重錘が接触する方向）とした。No.1鋼の最大荷重は約7kN、

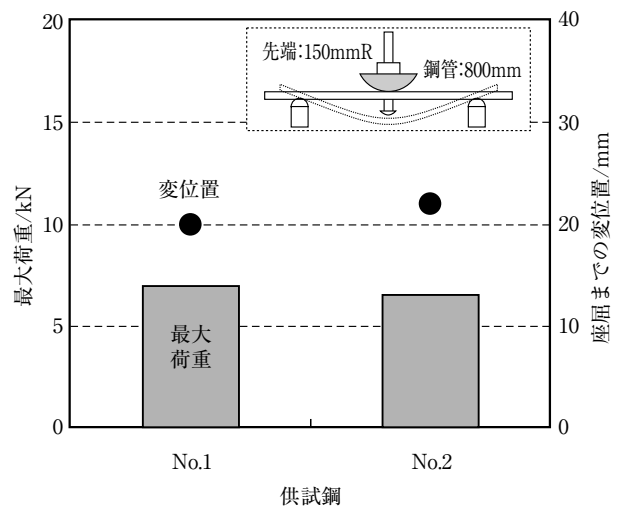


図3 静的曲げ試験結果

Fig. 3 Experimental results of static three point bending test for No.1 and No.2 ERW steel tubes.

座屈までの変位量は20mmであった。No.2鋼は、最大荷重が約6.5kN、座屈までの変位量が22mmであった。

図4に鋼管固定治具にて電縫鋼管の上下を固定し、静的軸圧縮試験を実施した結果を示す。No.1鋼の最大荷重は約100kN、座屈までの変位量は6mmであった。

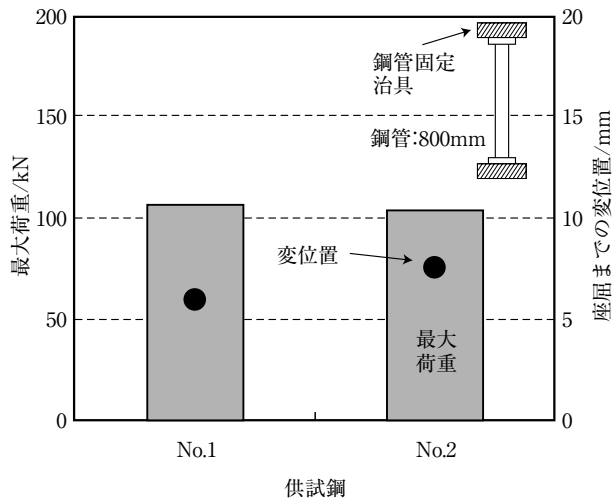


図4 静的軸圧縮試験結果

Fig. 4 Experimental results of static axial compression test for No.1 and No.2 ERW steel tubes.

No.2鋼は、最大荷重が約100kN、座屈までの変位量が7.5mmであった。なお、曲げ試験後の外観を観察したが、直管での座屈形状はNo.1鋼、No.2鋼いずれも同様であり、座屈部付近でクラックの発生は認められなかった。

以上より、圧延まま鋼板を素材とした電縫鋼管の静的な曲げおよび軸圧縮特性は、TRIP鋼を素材とした場合とほぼ同等であることがわかった。

### 3.3 落重型（動的）衝撃曲げおよび衝撃軸圧縮特性

自動車の衝突安全性を評価するため、部材として使用される電縫鋼管（素管）の衝撃吸収エネルギー特性などを調査しておくことは重要である。そこで、以下の落重型衝撃試験を実施した。

図5に600mm長さの電縫鋼管を用いて落重型衝撃曲げ試験を実施した結果を示す（溶接ビード部位置：0°）。重さ175kgの重錘に所定の長さの電縫鋼管を固定し、落下高さ11mより先端径150mmRの鋼製円柱に落下させた。なお、衝突速度55km/hを想定したものであり、最大ひずみ速度は約 $10^3/s$ である。No.1鋼は最大荷重が約12kNであり、150mm変形までの吸収エネルギーは0.63kJであった。No.2鋼は最大荷重が約11kNであり、吸収エネルギーは0.63kJであった。なお、No.1鋼およびNo.2鋼いずれの電縫鋼管の座屈端部においてクラック

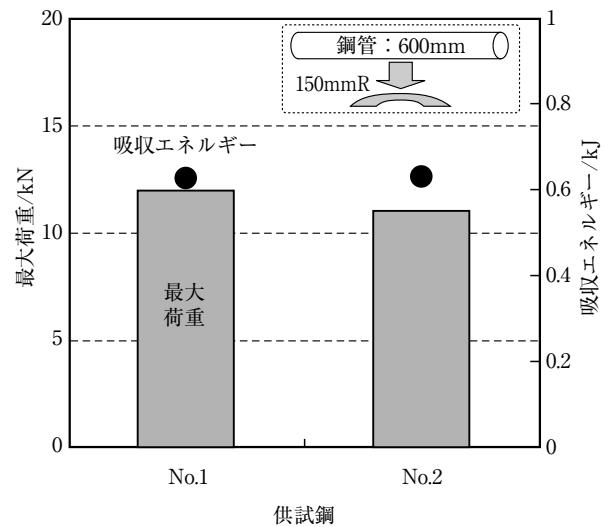


図5 落重型衝撃曲げ試験結果

Fig. 5 Experimental results of dynamic bending collapse test for No.1 and No.2 ERW steel tubes.

は認められなかった。

図6に800mm長さの電縫鋼管（両端に鋼板をTIG溶接）を用いて落重型衝撃軸圧縮試験<sup>8)</sup>を実施した結果を示す。重錘の重さは190kgであり、前述の曲げ試験と同様に落下高さは11mとした。No.1鋼は最大荷重が約170kNであり、180mm変形までの吸収エネルギーは約5kJであった。No.2鋼は最大荷重が約220kNであり、吸収エネルギーは7.5kJであった。なお、No.1鋼およびNo.2鋼いずれの電縫鋼管の座屈端部においてクラック

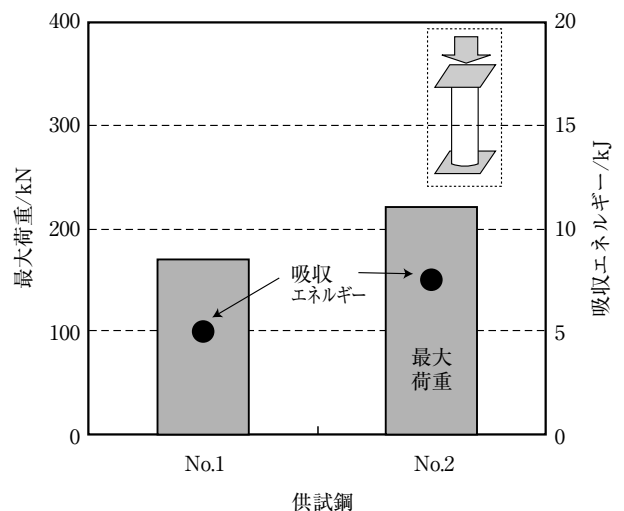


図6 落重型衝撃軸圧縮試験結果

Fig. 6 Experimental results of dynamic axial collapse test for No.1 and No.2 ERW steel tubes.

は認められなかった。

以上より、衝撃曲げ試験の場合、両者に特性の有意差はほとんど無く、同等の性能と考えられる。一方、衝撃軸圧縮の場合、TRIP鋼を素材としたNo.2鋼の方が衝撃特性としては優れていることが示唆された。

### 3.4 低温脆性

900mm長さの電縫鋼管を用いて落重型曲げによる低温脆性試験<sup>3)</sup>を実施した。試験方法は、冷媒槽中で所定温度に保持した直管を曲げスパン300mmに固定し、所定の高さからポンチ(先端半径:25mmR)を取付けた質量114kgの重錘を落下させるものである。なお、冷媒にはメタノールを用い、冷媒中に約10分間浸漬して落重型曲げ試験を行った。試験温度は室温(25℃)と-30℃の2種類であり、評価基準は、クラックが全く無いものを○、微細なクラックを生じたものを△とした。なお、本実験の範囲では折損は生じなかった。

表3に試験結果を示す。No.1鋼は、落下距離、溶接ビード部の位置および試験温度にかかわらず外観上割れは認められなかった。一方、No.2鋼は、落下距離200mmと落下距離300mmの25℃の場合、割れは全く観

表3 落重型低温脆性試験結果

Table 3 Experimental results of secondary working embrittlement by means of tube flattening test

落下距離	ビード位置	No.1鋼		No.2鋼	
		25℃	-30℃	25℃	-30℃
200mm	0°	-	○	-	○
	90°	-	○	-	○
300mm	0°	○	○	○	△
	90°	○	○	○	○

察されなかったが、落下距離300mmの溶接ビード部位置が0°で-30℃のみ、座屈部に数mm程度の微細なクラックが目視確認された。座屈の場合、曲げ方向は電縫鋼管に対して圧延方向に垂直な曲げとなる。No.2鋼は少なくともNo.1鋼より良好な限界曲げ半径をもつ素材を使用した電縫鋼管であるにもかかわらず、-30℃の試験で溶接ビード部ではなく、座屈端部に微細なクラックが発生した。

これは、電縫鋼管製造時に残留オーステナイトがほとんどマルテンサイト変態してしまうNo.2鋼は、DP鋼と同様に<sup>4)</sup>、マイクロボイドの発生頻度が高いか、もしくはボイドが成長しやすく、さらにフェライトとマルテンサイトの界面で微細なクラックが伝播しやすいためと考えられる。

これに対し、No.1鋼は、圧延方向に垂直な曲げの限界半径が1.5mm程度と小さいものの、フェライトと微細炭化物の展伸組織となっており、その均質性からマイクロボイドの発生が多少抑制されたものと考えられる。

以上より、溶接ビード部の位置によっては非常に微細なクラックの発生を伴うケースもあるため、この点を配慮すれば、自動車メーカーが懸念する-30℃での低温脆性は問題無いものと判断される。

図7および図8に、温度を室温から-40℃まで変化

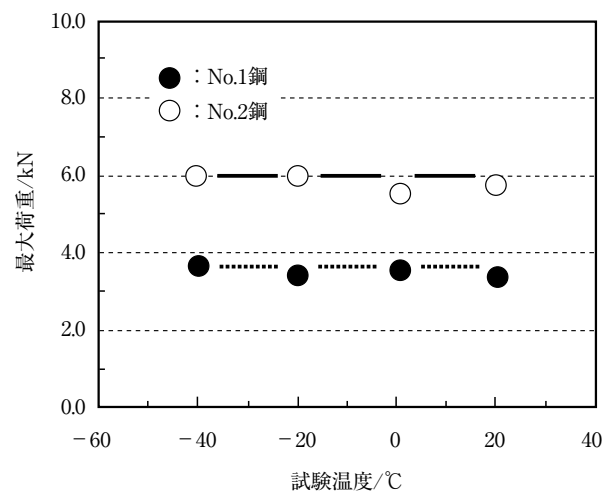


図7 へん平試験における最大荷重に及ぼす試験温度の影響

Fig. 7 Effect of testing temperatures on maximum load during a flattening test for No.1 and No.2 ERW steel tubes.

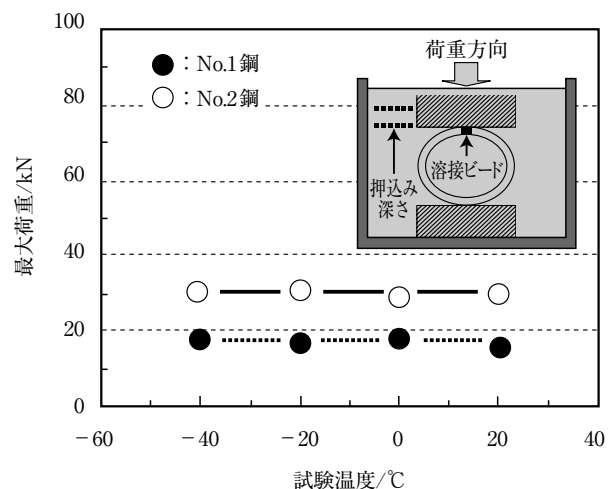


図8 へん平試験における押し込み深さに及ぼす試験温度の影響

Fig. 8 Effect of testing temperatures on penetration depth before cracking by means of a flattening test for No.1 and No.2 ERW steel tubes.

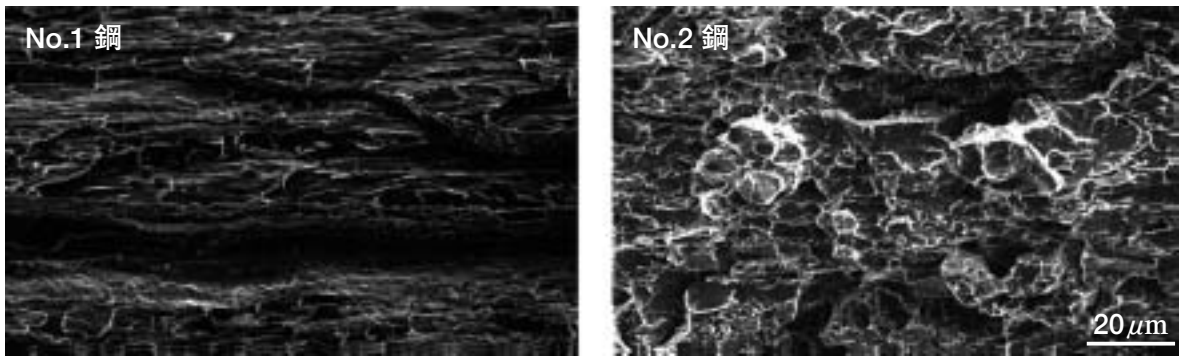


図9 -40℃の破面観察結果

Fig.9 Comparison of SEM fractographs of a flattening test specimens at -40℃.

させて、溶接ビード部を0°位置に設定するAへん平試験を実施した結果を示す。図7の最大荷重を見ると、No.1鋼とNo.2鋼では約1.5倍最大荷重は異なるものの、20℃（室温）から-40℃までの変化が極めて小さいことがわかった。また、図8の割れ発生までの押し込み深さを見ると、No.1鋼が約20mm、No.2鋼が約30mmと図7と同様に約1.5倍異なるものの、20℃（室温）から-40℃までの変化が極めて小さいことがわかった。

これより、20℃（室温）から-40℃までに延性脆性遷移温度（DBTT）は存在せず、いずれの鋼も自動車メーカーが懸念する-30℃での低温脆性は全く問題無いものと判断された。なお、図9に示すように、-40℃の割れ破面を走査型電子顕微鏡（SEM）にて観察したが、一部擬へき開破面は認められるものの、そのほとんどは

延性破面であった。

### 3.5 疲労特性

図10に900mm長さの電縫鋼管を用い、油圧サーボ式疲労試験機（島津製作所製）にて完全片振り疲労試験を行った結果を示す。なお、片側をチャックにて完全固定、溶接ビード部は90°、試験速度は5～7 Hzの曲げ疲労試験とした。No.1鋼およびNo.2鋼の疲労限はいずれも約500～550MPaとほぼ同等であり、また、従来からの知見である鋼板強度の1/2程度<sup>9)</sup>となっており、疲労特性に大きな問題が無いことを確認した。

## 4. 結言

薄肉中空製品は、高剛性および板材や棒鋼の軽量化の観点から、自動車などの構造用鋼管として広く使用されている。最近、この薄肉中空製品においても地球環境問題への対応から、さらなる軽量化が要望され始めている。そこで、590MPa級析出強化型熱延鋼板を加工強化した鋼板およびSi、Mn添加の中炭素系TRIP鋼を素材に肉厚1.0mm、外径寸法38.1mmの980MPa級電縫鋼管を実機試作し、諸特性を調査した。以下にその概要を示す。なお、590MPa級析出強化型熱延鋼板を加工強化した鋼板素材は、主に直管での使用を前提とした安価な一般加工用電縫鋼管を、TRIP鋼素材は、高加工用電縫鋼管を提供することを目的としたものである。

- (1) 一般加工用電縫鋼管は、YSが約890MPa、TSが約1010MPa、T.Elが6%であり、また、拡管比が1.1D<sub>0</sub>、Aへん平、Bへん平いずれも2/3D<sub>0</sub>であった。
- (2) 高加工用電縫鋼管は、YSが約810MPa、TSが約1070MPa、T.Elが23%であり、また、拡管比が1.2D<sub>0</sub>、Aへん平、Bへん平いずれも2/5D<sub>0</sub>であった。

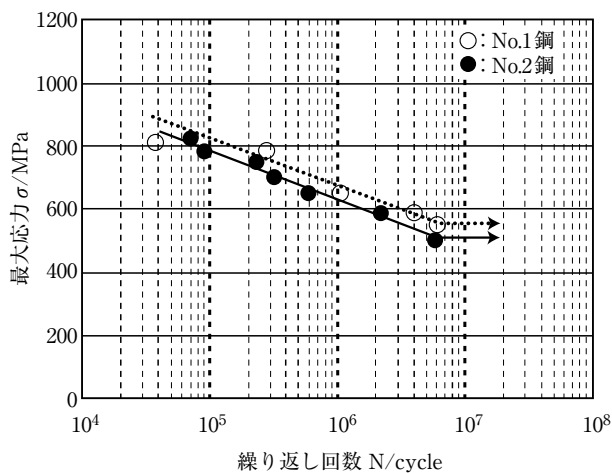


図10 疲労試験結果

Fig.10 Relationship between stress amplitude and number of cycles to failure for No.1 and No.2 ERW steel tubes steel.

- (3) 静的曲げおよび軸圧縮試験の結果、一般加工用電縫鋼管と高加工用電縫鋼管の両特性はほぼ同等であることがわかった。
- (4) 落重型衝撃曲げおよび軸圧縮試験の結果、衝突時曲げ主体の変形が加わる部位においては一般加工用電縫鋼管および高加工用電縫鋼管両方の適用が、また、衝突時軸圧縮主体の変形が生じる部位においては若干ではあるが、高加工用電縫鋼管の適用が望ましいことが推定された。
- (5) 落重型曲げによる低温脆性試験および試験温度を室温から $-40^{\circ}\text{C}$ まで変化させたAへん平試験の結果、高加工用電縫鋼管のみ変形方向と溶接ビード部位置に配慮する必要はあるものの、全体的には自動車メーカーが懸念する $-30^{\circ}\text{C}$ での低温脆性は問題無いものと判断された。また、室温から $-40^{\circ}\text{C}$ までに延性脆性遷移温度 (DBTT) は存在しないことがわかった。
- (6) 油圧サーボ式疲労試験の結果、一般加工用鋼管および高加工用鋼管の疲労限は、いずれも鋼板強度の1/2程度であり、疲労特性に大きな問題が無いことを確認した。

以上、最近開発した2種類の980MPa級高強度電縫鋼管の諸特性を紹介した。いずれも主に自動車車体の軽量化と衝突安全性に貢献するものであり、今後、自動車の構造用鋼管を中心として幅広く適用されていくことが期待される。

#### 参考文献

- 1) 中澤嘉昭, 田村憲次, 吉田道孝, 高木勝利, 嘉納光敏 : 自動車技術会春季大会学術講演会前刷集, (2005), 36.
- 2) T. Matsumoto, S. Hamanaka, T. Tanaka : Nisshin Steel Tech. Rep., 64 (1991), 57.
- 3) T. Matsumoto, T. Kondou, S. Kodama, S. Fujiwara : Nisshin Steel Tech. Rep., 84 (2003), 32.
- 4) S. Nomura, Y. Hirose, N. Komatsubara, K. Kunishige, T. Fukuyama, S. Nakai : CAMP-ISIJ, 5 (1992), 1851.
- 5) S. Hiwatashi, M. Takahashi, Y. Sakuma, M. Usuda, O. Akisue, J. Itami, N. Ikenaga : CAMP-ISIJ, 5 (1992), 1847.
- 6) K. Kunishige, N. Komatsubara, T. Hashimoto, I. Tamura : CAMP-ISIJ, 1 (1988), 1843.
- 7) R. Takag : J. Jpn. Soc. Technol. Plast., 24 (1983), 1101.
- 8) 渡辺謙一 : 自動車用材料の高速変形に関する研究会成果報告書, 日本鉄鋼協会編, 東京, (2001), 19.
- 9) H. Kihara, H. Suzuki, H. Kanatani : J. Jpn. Weld. Soc., 27 (1985), 36.