

電縫管の残留応力に関する研究 第6報

——製造プロセスが残留応力分布に与える影響 III——

Study on Residual Stress of Electric Welded Pipes · 6th Report

——Influence of Manufacturing Process on Residual Stress III——

木内 学\*・新谷 賢\*

Manabu KIUCHI and Ken SHINTANI

1. ま え が き

筆者らは、電縫管の品質評価法に関する研究の一環として、成形過程における各種条件が、最終製品の残留応力に与える影響について、基礎的研究を進めている。

既報では残留応力の測定方法を提案し<sup>1)</sup>、この方法により、基礎実験によるFR通過後の半製品、実生産の各成形段階において採取した半製品、または、最終製品に残留する応力について測定を行った<sup>2)~5)</sup>。

本報では、各社の異なるライン構成により実生産された、溶接直後の半製品、および、最終製品について、 $t/D$  (=9.45%)の大きい範囲をも含め、製造プロセスが周方向各位置における残留応力に与える影響について、総合的に検討した結果を報告する。

2. 測定方法

本研究で開発した残留応力の測定方法については、既報<sup>1)2)</sup>に詳述してあるので、ここでは説明を省略する。測定に際して用いている座標軸と各方向の応力-ひずみ成分の表示方法、および、各方向のひずみ成分の定義とその関係は前報<sup>5)</sup>を参照されたい。

3. 測定結果および考察

図1に、溶接直後の半製品と最終製品の提供を受けた各社のライン構成、素板材質、最終製品公称寸法、および、各製品の表示記号を示す。

3.1 各方向の弾性回復ひずみ分布の測定例

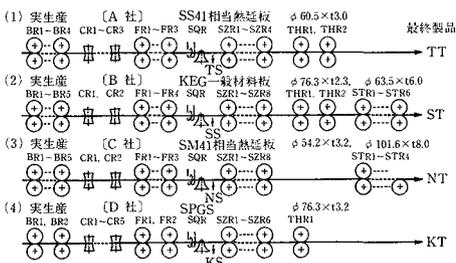


図1 実生産(各社)のライン構成

図2にB, C社の製品について、外表面の弾性回復曲げひずみの周方向分布の測定例を示す。一般に、外表面の弾性回復曲げひずみは、溶接直後から最終製品に至る過程で大きく変化するので、それらの変化を、溶接部、側

表1 外表面の弾性回復曲げひずみの変化

測定位置	溶接部	側部		底部	
		溶接直後の半製品	最終製品	溶接直後の半製品	最終製品
長手方向の外表面の弾性回復曲げひずみ ( $\Delta\epsilon_{xx}$ )	$t/D$	$\Delta\epsilon_{xx} <$	$\Delta\epsilon_{xx} >$	$\Delta\epsilon_{xx} >$	$\Delta\epsilon_{xx} >$
	小	0	負	負	負
くら形のそり: 負	$t/D$	$\Delta\epsilon_{xx} <$	$\Delta\epsilon_{xx} >$	$\Delta\epsilon_{xx} >$	$\Delta\epsilon_{xx} >$
	大	0	負	負	負
周方向の外表面の弾性回復曲げひずみ ( $\Delta\epsilon_{\theta\theta}$ )	$t/D$	$\Delta\epsilon_{\theta\theta} <$	$\Delta\epsilon_{\theta\theta} <$	$\Delta\epsilon_{\theta\theta} >$	$\Delta\epsilon_{\theta\theta} >$
	小	0	負	負	負
曲率半径が大きくなる方向: 負	$t/D$	$\Delta\epsilon_{\theta\theta} <$	$\Delta\epsilon_{\theta\theta} <$	$\Delta\epsilon_{\theta\theta} <$	$\Delta\epsilon_{\theta\theta} <$
	大	負	負	負	負

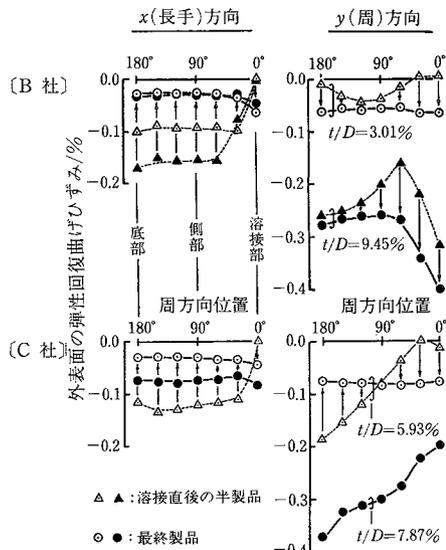


図2 外表面の弾性回復曲げひずみの周方向分布

\*東京大学生産技術研究所 第2部

部、底部に注目してまとめてみると、表 1 のようになる。  
 図 3 は、長手方向・周方向の外表面の弾性回復曲げひずみの関係の、溶接後の過程での変化を図示したものである。 $t/D$ の小さい範囲では、周方向全体に、長手・周両方向の外表面の弾性回復曲げひずみの減少・均一化が進んでいるようすがわかり、多段のSZR・THR・STRを配しているB、C社の場合、それがより効果的に行われていることがわかる。 $t/D$ の増加に伴い、溶接直後の半製品の外表面の弾性回復曲げひずみの絶対値が増大する。しかし、その場合にも、長手方向の弾性回復曲げひずみについては、最終製品に至る過程で、周方向に減少・均一

化が進むが、周方向の弾性回復曲げひずみについては、減少・均一化しきれなくなることがわかる。

図 4 にB、C社の製品について、弾性回復膜ひずみの周方向分布の測定例を示す。弾性回復膜ひずみについても、溶接部、側部、底部に注目して、溶接直後から最終製品に至る過程での変化をまとめると、表 2 のように示される。

図 5 は、長手方向・周方向の弾性回復膜ひずみの関係の、溶接後の過程での変化を示す。 $t/D$ の小さい範囲では、周方向全体に、長手・周両方向の弾性回復膜ひずみの減少・均一化が進んでいるようすがわかり、多段のSZR・THR・STRを配しているB、C社のほうが、減少・均一化が効果的に行われていることがわかる。 $t/D$ が増加しても、長手方向の弾性回復膜ひずみの値はあまり変わらず、周方向に減少・均一化が進むが、周方向では、 $t/D$ の増大に伴い、伸びの回復ひずみが増大し、SZR・THR・STRなどによっても、周方向に減少・均一化しきれなくなることがわかる。

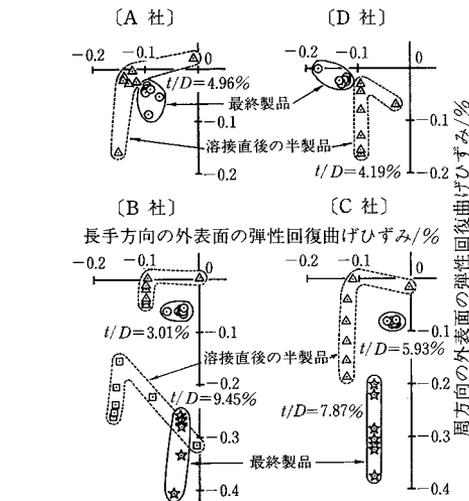


図 3 長手方向・周方向の外表面の弾性回復曲げひずみの関係

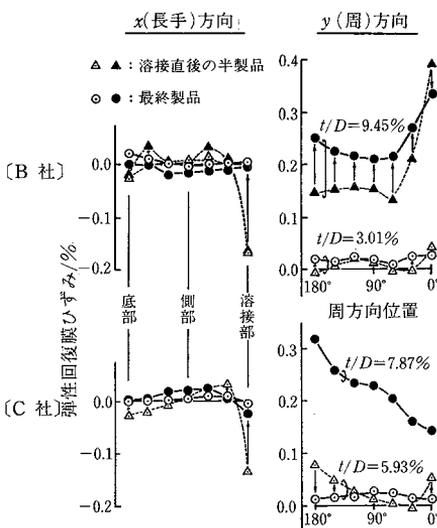


図 4 弾性回復膜ひずみの周方向分布

表 2 弾性回復膜ひずみの変化

△: 絶対値の 大小を表す	溶 接 部		側 部		底 部	
	溶接直後の 半製品	最終 製品	溶接直後の 半製品	最終 製品	溶接直後の 半製品	最終 製品
長手方向の弾性 回復膜ひずみ ( $\Delta e_{xx}$ )	$t/D$ 小	縮み > または 縮み	0 (縮み) > または 縮み	0 (縮み) > または 縮み	縮み > 0	縮み > 0
	$t/D$ 大	縮み > または 縮み	0 < 縮み	縮み > 0	縮み > 0	縮み > 0
周方向の弾性回 復膜ひずみ ( $\Delta e_{\theta\theta}$ )	$t/D$ 小	伸び > または 伸び	伸び = 伸び	伸び > 伸び	伸び > 伸び	伸び > 伸び
	$t/D$ 大	伸び > 伸び	伸び < 伸び	伸び < 伸び	伸び < 伸び	伸び < 伸び

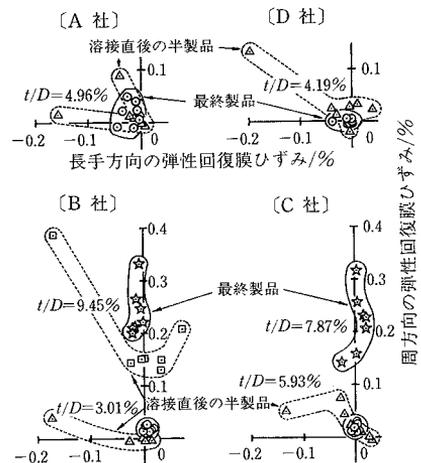


図 5 長手方向・周方向の弾性回復膜ひずみの関係

研究速報

図6は、溶接直後の半製品と最終製品の、長手方向、周方向の応力解放時の全体的な伸縮をみたものである。図から、各社の製造プロセスにより異なるが、長手方向には、 $-0.02\% \sim +0.01\%$ 程度の伸縮が発生しうることがわかる。周方向については、各社の製品とも応力解放時には伸びひずみが発生し、さらに、 $t/D$ の増加に伴い、伸びが大きくなる傾向にある。

図7にB、C社の $xy$ -面内の外表面の弾性回復せん断ひずみの周方向分布の測定例を示す。外表面の弾性回復せん断ひずみを、溶接部、側部、底部に注目し、溶接直後から最終製品に至る過程の変化を、一般的にまとめて

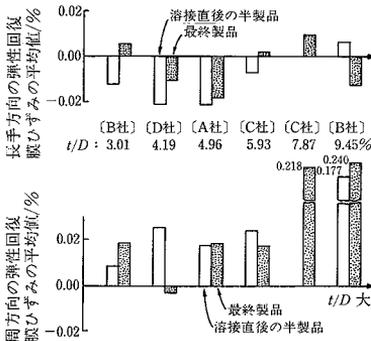


図6 長手方向・周方向の伸縮

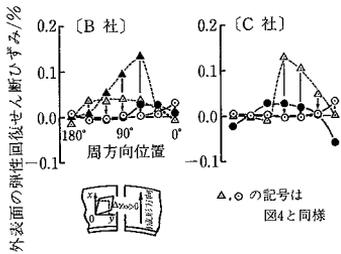


図7 外表面の弾性回復せん断ひずみの周方向分布

表3に示す。

なお、 $y_2$ -面内・ $zx$ -面内の弾性回復せん断ひずみは、 $xy$ -面内の弾性回復せん断ひずみに比較して十分小さく、ほとんど常に無視できる。

3.2 残留応力の計算例

各方向の弾性回復ひずみ成分を測定した結果、 $t/D$ の増加に伴い、各ひずみ値が弾性限を越えていると判断される場合もあるので、まず、弾性回復変形過程の計算式より、各方向の応力成分を算出して、それらより、相当応力 $\bar{\sigma}$ を計算し、 $\bar{\sigma}$ が降伏応力より大きい場合には、弾性限を越える分のひずみについて、弾塑性回復変形過程の計算式を用いるという方法で、残留応力の計算を行った。ただし、既報<sup>1)-5)</sup>と同様、各方向の弾性回復ひずみ成分は、板厚方向に直線分布しているものと仮定している。

表3 外表面の弾性回復せん断ひずみの変化

Z: 絶対値の 大小を表す	溶接部	側部	底部	
	溶接直後の半製品	最終製品	溶接直後の半製品	
xy-面内の外表面の弾性回復せん断ひずみ ( $\Delta\gamma_{xy}$ )	t/D 小	0 < 正	正 > 0	0 = 0
	t/D 大	0 < 正	正 > 0	0 = 0

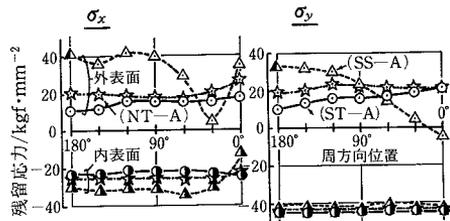


図9 周方向の残留応力分布

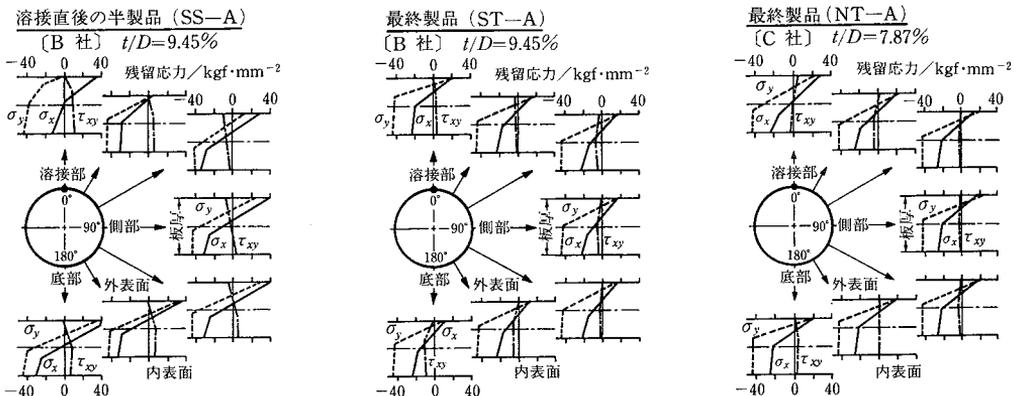


図8 板厚方向の残留応力分布

表 4 残留応力の変化

		溶 接 部		側 部		底 部	
		溶接直後の半製品	最終製品	溶接直後の半製品	最終製品	溶接直後の半製品	最終製品
長手方向の残留応力 ( $\sigma_x$ )	$t/D$ 大	外表面側	引張	引張	引張	引張	引張
	$t/D$ 小	外表面側	引張	引張	引張	引張	引張
		内表面側	引張	圧縮	圧縮	圧縮	圧縮
	$t/D$ 大	外表面側	引張	引張	引張	引張	引張
周方向の残留応力 ( $\sigma_y$ )	$t/D$ 大	外表面側	圧縮	圧縮	圧縮	圧縮	圧縮
	$t/D$ 小	外表面側	引張	引張	引張	引張	引張
		内表面側	引張	圧縮	圧縮	圧縮	圧縮
	$t/D$ 大	外表面側	圧縮	圧縮	圧縮	圧縮	圧縮

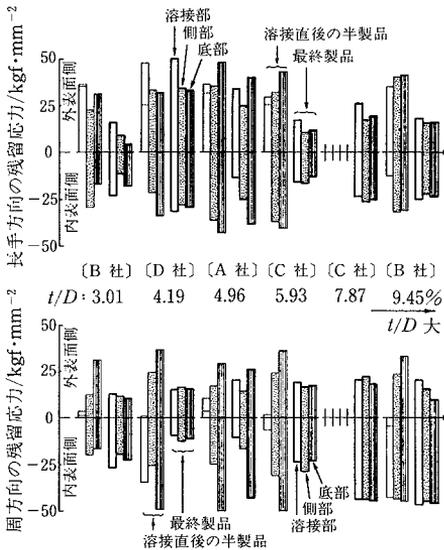


図10 残留応力分布の変化

図 8, 9 に B, C 社の溶接直後の半製品と最終製品について、周方向各位置における残留応力  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  の分布の計算例を示す。さらに、溶接部、側部、底部の  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  について、溶接直後から最終製品に至る過程の変化と、 $t/D$  の増加に伴う変化とを、板厚方向にみて、まとめた結果が表 4 である。さらにそれらを、各社別にみたのが図 10 である。

図 11 は、長手方向・周方向の残留応力 ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ) の関係の、溶接後の過程での変化を示す。 $t/D$  が小さい場合には、周方向全体について、 $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  の減少・均一化が進んでいくようすがわかり、多段の SZR・THR・STR を配している B, C 社の場合に、より効果的に行われていることがわかる。さらに、その際、外表面側と内表面側とを比較すると、長手・周両方向とも、外表面側の引張りの残留応力のほうが小さくなる傾向にある。 $t/D$  の増加に伴い、溶接直後の半製品、最終製品の内表面側から内

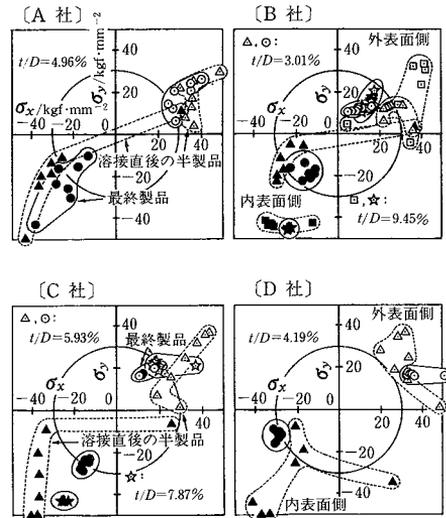


図 11 長手方向・周方向の残留応力の関係

部へかけて、降伏応力相当の圧縮応力が残留するようになる。B 社の  $t/D=3.01\%$  と  $9.45\%$  の製品は同一ライン構成により成形されたものであるが、結果をみると、 $t/D$  の増加に伴い、内表面側から板厚のほぼ中央までの範囲に、降伏応力相当の圧縮の残留応力が存在し、現行の成形条件では、内表面側の残留応力の低減を図ることはできないことがわかる。すなわち、リダクションや繰返し曲げ変形を適正に加えることが望ましいと考えられ、現状の加工条件の見直しが必要であると推察される。

4. ま と め

本報では、筆者らが提案した測定方法により、実生産で得られた溶接直後の半製品や最終製品に残留する応力の測定結果について示した。以上の結果より、各製造プロセスの違いが溶接直後の半製品や最終製品の残留応力に影響を与えることを明らかにすることができた。残留応力の均一化を行うには、成形の後工程に多段の SZR・THR・STR を配し、リダクションや繰返し曲げ変形を適正に加えることが有効であることがわかった。さらに、 $t/D$  が大きくなると、残留応力の効果的な低減のためには、ミル剛性の不足などが考えられるので、現状の加工条件の見直しなどが必要であると推定される結果を得た。今後さらに、各製造プロセスの半製品、あるいは、最終製品に関する測定を進め、電縫管の品質評価に有用なデータの蓄積を図る予定である。(1987年 3月 27日 受理)

参 考 文 献

- 1) 木内・新谷：35回塑加連講論，17
- 2) 木内・新谷：昭60春塑加講論，507
- 3) 木内・新谷：36回塑加連講論，663
- 4) 木内・新谷：昭61春塑加講論，267
- 5) 木内・新谷：37回塑加連講論，165