要約版

川崎製鉄技報
KAWASAKI STEEL GIHO
Vol.2 (1970) No.2

耐候性溶接構造用鋼板の機械的性質と溶接性

Mechanical Properties and Weldability of Atmospheric Corrosion Resisting Steels

安田　達(Tohoru Yasuda)　坪井　潤一郎(Junichiro Tsuboi)　杉江　英司(Eiji Sugie)
船越　督己(Tokushi Funakoshi)　田中　康浩(Michihiro Tanaka)

要旨：
RIVER TEN は JIS の溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材（SMA）の規格を満足し，そのうち 50kg/mm2 以上の引張強さをもつ鋼材は Nb を含有するのが特徴であり, それにより機械的性質を向上し, 溶接性を改良している。脆性破壊の発生特性をあらわす NDT 温度は約-30℃であり, RIVER TEN 58 の二重引張試験による亀裂伝播停止温度は WES 基準Ａ種で-36℃，Ｇ種で-74℃である。溶接最高硬さは約 330Hv であり，ｙスリット拘束割れ試験によるルート割れ防止温度は 50mm の RIVER TEN 50 では，100℃，26mm の RIVER TEN 58 では室温でも割れは発生しない。溶接部の延性，靭性は良好であり，26mm の RIVER TEN 58 のボンド部のディープノッチ試験による脆性破壊発生温度は負荷応力 σy/2.5，亀裂長さ 80mm のとき入熱量 91,000Joule/cm を与えても-100℃以下であった。

Synopsis：
RIVER TEN steels satisfy JIS as "hot rolled atmospheric corrosion resisting steel for welded structure. "Some of them that have high tensile strength of over 50kg/mm2 are characterized by their content of Nb, which improves their mechanical properties and reforms their weldability. NDT temperature which represents the brittle fracture initiation characteristics of high tensile strength RIVER TEN is about -30℃ and the arresting temperature of brittle crack in a double tension test of RIVER TEN 53 is -36℃ for a grade A and -74℃ for a grade G, both in WES standards. Maximum hardness of welds in about 330 Hv for high tensile RIVER TEN steels and the preheat temperature of plates at which the initiation of root crack is prevented in a y-groove restraint cracking test is 100℃ for RIVER TEN 50 of 50mm thickness, but no cracks appear at room temperature for RIVER TEN 58 of 26mm thickness. The elongation and notch ductility of welds are very good. Brittle fracture initiation temperature in a deep notch test for the bond part of 26mm thick RIVER TEN 58 is below -100℃ even if a heat imput of 91,000 Joule/cm is given, when an applied stress is under σy/2.5 and a crack length is 80mm.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

UDC 669.14.018.295.82 41
621.791.011. : 539.41.5

耐候性溶接構造用鋼板の機械的性質と溶接性

Mechanical Properties and Weldability of Atmospheric Corrosion Resisting Steels

安田　達* Tohoru Yasuda
坪井潤一郎** Junichiro Tsuboi
杉江英司*** Eiji Sugie
船越督己**** Tokushi Funakoshi
田中康浩***** Michihiro Tanaka

Synopsis:

RIVER TEN steels satisfy JIS as "hot rolled atmospheric corrosion resisting steel for welded structure." Some of them that have high tensile strength of over 50kg/mm² are characterized by their content of Nb, which improves their mechanical properties and reforms their weldability. NDT temperature which represents the brittle fracture initiaion characteristics of high tensile strength **RIVER TEN** is about −30°C and the arresting temperature of brittle crack in a double tension test of **RIVER TEN** 53 is −36°C for a grade A and −74°C for a grade G, both in WES standards.

Maximum hardness of welds is about 330 Hv for high tensile **RIVER TEN** steels and the preheat temperature of plates at which the initiation of root crack is prevented in a y-groove restraint cracking test is 100°C for **RIVER TEN** 50 of 50mm thickness, but no cracks appear at room temperature for **RIVER TEN** 58 of 26mm thickness. The elongation and notch ductility of welds are very good. Brittle fracture initiation temperature in a deep notch test for the bond part of 26mm thick **RIVER TEN** 58 is below −100°C even if a heat imput of 91,000 Joule/cm is given, when an applied stress is under $\sigma_y/2.5$ and a crack length is 80mm.

1. 緒　言

耐候性鋼板は鋼材の腐蝕を考えた場合の経済的な利点により，車両，小型船舶，土木，建築構造物などに用いられており，その需要はますます多くなる傾向にある。当社の製品にもその使用目的により，鉄道車両用 RIVER TEN R，一般向耐候性鋼板の RIVER TEN 41S，41，50M，溶接構造用 RIVER TEN 41A，B，C，50A，B，C，53 B，C，58，62，とくに耐硫酸性を考慮したRIVER TEN 45K，50K などがある。本稿は機械的性質と溶接性が重視される溶接構造用 RIVER TEN 50(53)と RIVER TEN 58 (62) の諸特性についてまとめたものである。RIVER TEN 50，58はそれぞれ 50，58kg/mm² の引張強さをもち，J

* 千葉製鉄所管理部厚板管理課課長
** 技術研究所溶接研究室主任研究員
*** 技術研究所溶接研究室
**** 技術研究所厚板研究室室長
***** 技術研究所厚板研究室主任研究員

表 1　RIVER TEN の化学成分（wt%）

鋼　種	規　　格	対応規格	板厚	記号	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Nb	Mo	V	熱　処　理
耐候性鋼板	RIVER TEN 41S		4.5		.10	.18	.35	.024	.010	.25	.19	.31	.008	-	-	圧延のまま
	RIVER TEN 41		12.0		.12	.03	.52	.015	.020	.30	—	—	·	—	—	圧延のまま
	RIVER TEN 50M		1.6		.09	.29	.49	.069	.023	.24	.22	.40	.030	—	—	スキンパス
			3.2		.08	.30	.39	.070	.010	.33	.40	.36	.030	—	—	圧延のまま
			12.0		.08	.30	.50	.086	.017	.40	.39	.72	.028	—	—	圧延のまま
耐候性溶接構造用鋼板	RIVER TEN 41B, C	SM 41B, C	12	a	.11	.03	.54	.015	.023	.31	.20	.34	—	—	-	圧延のまま
			25	b	.12	.04	.54	.015	.026	.31	.19	.32	—	—	—	圧延のまま
			38	c	.12	.04	.57	.016	.019	.32	.21	.33	—	—	—	焼ならし
	RIVER TEN 50B, C	SMA 50B, C	12	d	.12	.38	.62	.013	.019	.34	.28	.27	.018	—	—	圧延のまま
			25	e	.12	.38	.62	.013	.019	.34	.28	.27	.018	—	—	圧延のまま
			50	f	.13	.43	.65	.020	.006	.29	.21	.49	.031	—	—	焼ならし
	RIVER TEN 53	SM 53	38	g	.13	.38	.67	.019	.008	.27	.34	.49	.035	—	—	圧延のまま
	RIVER TEN 58(62)	SMA 58	12	h	.14	.39	.75	.017	.015	.34	.34	.51	.015	.050	.032	焼入焼もどし
			26	i	.13	.50	.56	.022	.010	.33	.33	.49	.034	.065	.033	焼入焼もどし
			50	j	.15	.42	.74	.015	.005	.29	.41	.52	.017	.100	.042	焼入焼もどし

ＩＳのＳＭＡ50あるいはＳＭＡ58を満足し，さらに日本溶接協会ＨＷ36あるいはＨＷ50として認定されている。

2. RIVER TEN の機械的性質

RIVER TEN の化学成分の一例を**表1**に示す。一般に耐候性鋼板には耐蝕性の観点よりＰ，Ni，Cr および Cu を添加しているが，同じ耐候性鋼板でも溶接構造用鋼板では，溶接割れあるいは母材および溶接部の衝撃特性の低下をふせぐため，Ｐの含有量を低くしており，また50kg/mm^{2}級の材料では Nb による強化によってＣ当量の増加を少なくして，溶接硬化性をおさえている。これらの鋼板は熱間圧延のままでも良好な機械的性質をもっているが，とくに厚い鋼板では焼ならし処理により靱性の向上をはかっている。さらに58(62) kg/mm^{2}級の材料は焼入焼もどし処理によって強度と靱性の増加をはかっており，添加されている Mo，Ｖは焼入性あるいは焼もどし抵抗の向上を目的としている。

これらの諸元素を機械的性質との関連よりみると，Ni，Cr，Cu は素地への固溶による硬化が考えられるが，添加量が少ないのでその効果はほとんど期待できない。Cu，Nb による析出硬化はかなり特徴的な現象を示すことが知られている。また Nb，V，Al などは細粒化による強化作用をもち，焼ならし処理でもその効果を発揮する。

Ni は靱性を向上させる元素であるが，RIVER TEN では添加量が少ないためほとんど効果はない。また Nb，V，Al などによる細粒化作用は靱性にも良い効果をもたらし，もちろん焼ならしや焼入焼もどしなどの熱処理も細粒化の観点から有効である。

以上のように RIVER TEN に添加されている Ni，Cr，Cu などは，おもに耐候性の改善を目的としたものであり，機械的性質との関連からみて特徴ある挙動を示すのは Cu，Nb であるといえよう。

2·1　機械的性質におよぼす Cu，Nb の影響

Cu はフェライト中に 800°C で 1.39wt%，700°Cで0.52wt%，600°C で 0.15 wt%固溶し[1]，過飽和分は Cu−Fe 固溶体の ε 相（Cu(ε)）として析出する。Cu（ε）の析出現象に関する研究はかなり多く[2]，一般に500°C附近で数時間の析出処理により直径およそ 100Å の球状析出物になり，顕著な析出硬化がみられる。また Nb は少量で鋼の機械的性質を大きく変化させる元素であり，これはNb炭（窒）化物に起因する効果である。Nb は圧延時の加熱で固溶するが，圧延および冷却中に炭（窒）化物として微細に析出し，この析出物が結晶粒の成長をさまたげ細粒化作用をすると同時に析出硬化により素地を硬くする。しかし焼な

表 2　実験室溶製 RIVER TEN 50の化学成分と引張特性

鋼材	化学成分 wt%										引張試験 JIS 5号					
											圧延のまま			焼ならし		
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Nb	Ceq	降伏点 kg/mm²	引張強さ kg/mm²	伸び %	降伏点 kg/mm²	引張強さ kg/mm²	伸び %
A	.11	.36	.73	.016	.006	.31	.39	.31	.036	.333	44.5	56.1	36	36.6	48.1	42
B	.11	.36	.69	.017	.008	.32	.38	-	.037	.324	44.8	54.9	35	34.9	47.9	42
C	.11	.43	.69	.017	.007	.30	.40	-	-	.331	32.3	46.3	43	31.9	45.6	44

らし温度での加熱によって析出硬化はむしろ過時効状態になり，効果は少なくなる[3)]。また焼入性への影響については，オーステナイト化温度が高い場合にはいくぶん焼入硬化性を増すが，低い場合にはほとんど効果を示さない[3)]。また焼もどし後の性質についても高温焼入によって固溶したNbが析出し，焼もどし抵抗が増加する可能性も考えられる。しかし，Nb の効果は圧延材においてもっとも顕著にあらわれ，RIVER TENではこのような特性を十分発揮するよう考慮している。

Cu と Nb の機械的性質への影響を明確に把握するため実験室的な検討を行なった。小型鋼塊を鍛造後熱間圧延した板厚 8 mmの鋼板を用い，Cu と Nb が RIVER TEN 50の引張特性におよぼす影響を**表 2**に示す。圧延のままの状態ではNbと Cu を含有するA鋼および Nb のみを含有するB鋼の降伏点，引張強さは Nb と Cu を含有しないC鋼よりそれぞれ 12kg/mm², 10kg/mm² 大きい。しかし Cu の添加による強度の増加はほとんどみられない。また焼ならし材では Nb の効果はほとんど失なわれている。

圧延材における Nb, Cu の衝撃特性への影響を**図 1**に示す。V ノッチシャルピー試験片（5mm ×10mm×55mm）による結果では，Nb, Cu を含有することにより遷移温度は高温側に移行し，衝撃値は低くなるが，これはおもに Nb の影響であることがわかる。

図 2に 400～1,200°C の各温度に加熱し，空冷した15mm 立方の試験片の硬さの変化を示す。圧延のままの状態で析出硬化した Nb 添加のA，B鋼は加熱温度を高くすると軟化する傾向がみられるが，500～600°C でやや硬化する。さらに高温ではふたたび軟化し，α−γ 変態点以上では Nb 炭（窒）化物の析出は過時効状態となり Nb 無添

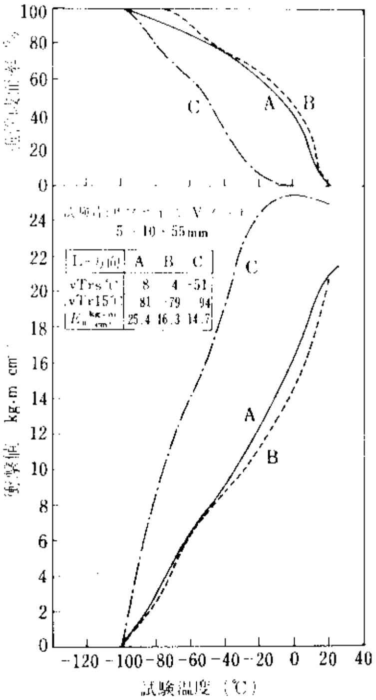


図 1　実験室溶製 RIVER TEN 50のシャルピー衝撃試験結果

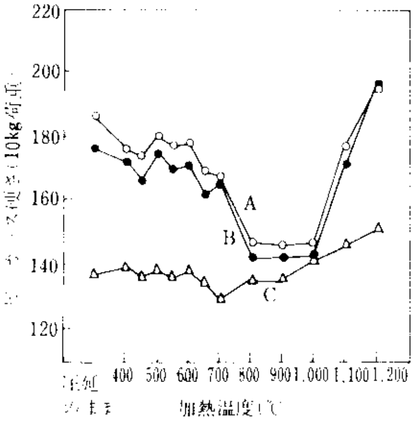
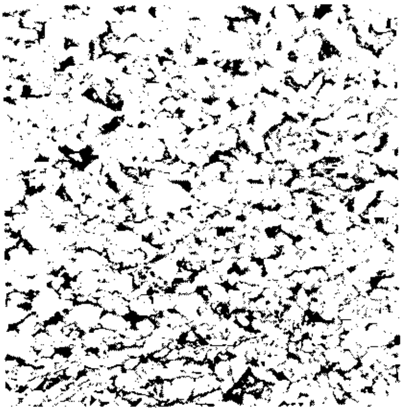
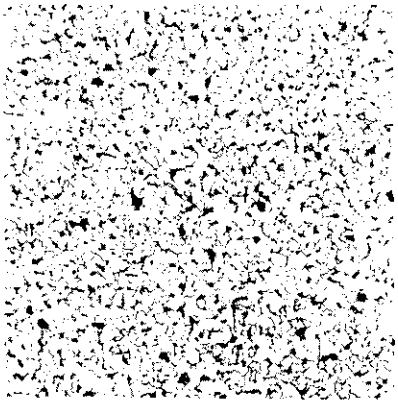


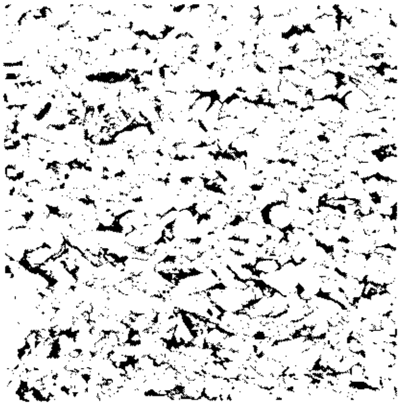
図 2　実験室溶製 RIVER TEN 50の加熱による硬さ変化



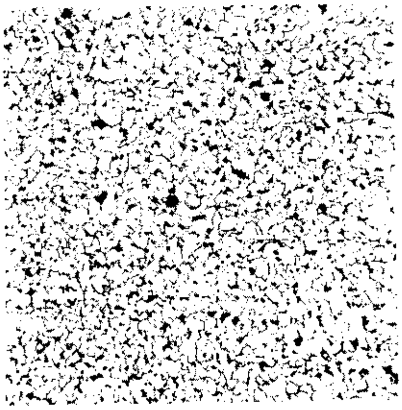
(A)　圧延のまま



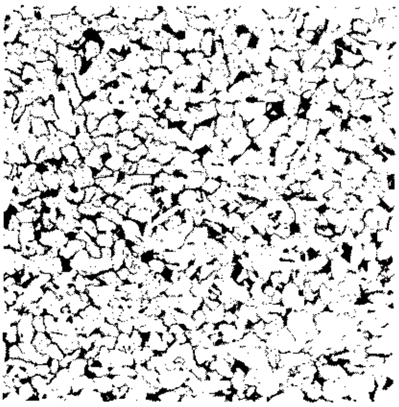
(A)　焼ならし



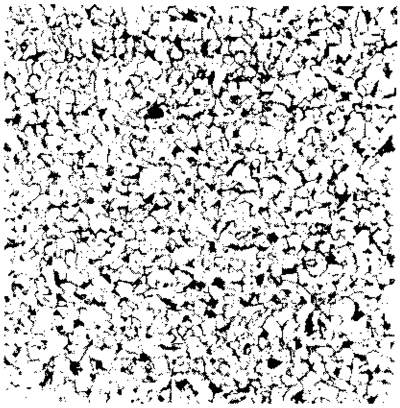
(B)　圧延のまま



(B)　焼ならし



(C)　圧延のまま



(C)　焼ならし

写真 1　実験室溶製 RIVER TEN 50の光学顕微鏡組織（×100）

加のC鋼と同程度にまで軟化する。各試料とも1,000°C以上に加熱すると粗粒化とともに針状組織になり，しだいに硬化するが，A，B鋼では，Nbの再固溶と析出によってとくに著しい硬化がみられる。**写真1**に各試料の圧延のままおよび焼ならし後の光学顕微鏡組織を示す。圧延のままのA，B鋼の組織は一部ベイナイト的であるが，圧延のままや焼ならしの状態ではともにC鋼より

(A) 圧延のまま

(B) 焼ならし

写真 2 実験室溶製 RIVER TEN 50A 鋼の電子顕微鏡組織

細粒である。また**写真2**は圧延のままのA鋼を焼ならししたときの Nb 析出物の変化を示すものであり，焼ならしにより析出物はいちじるしく粗大化している。析出した化合物型 Nb は塩酸処理での不溶性 Nb 量より推定できる。A，B鋼での全 Nb 量に対する不溶性 Nb 量の比率は圧延のままでそれぞれ22.5%，28.6%であるが，焼ならし状態では70.8%，66.8%に変化している。ただし圧延のままの状態では Nb 化合物の寸法はきわめて小さく，不溶性 Nb として完全に分離されていないおそれはある。

Nb の効果を消し，Cu のみを過飽和固溶させるため焼ならしをしたA，B鋼を400～650°Cに 1 h 加熱して硬さを測定し，Cu(ε) による析出硬化の挙動を調べた結果を図3に示す。A鋼とB鋼の硬さの差（A－B）は Cu(ε) の析出による効果をあらわし，550°C でやや析出硬化がみとめられるが，その量はわずかである。引張および衝撃試験の結果を考え合わせると RIVER TEN の機械的性質におよぼす Cu の影響はきわめて少なく，Cu はおもに耐候性の向上のために添加されていることがわかる。

800～1,200°C の各温度で 30min 保持したのち水中で急冷した試料の硬さの変化を図4に示す。A，B鋼の 900 および 1,000°C からの急冷による焼入硬化性は Nb と Cu を含まないC鋼にくらべ明らかに小さいが，これは未固溶の NbC が残存するため結晶粒の粗大化が遅れることおよび固溶C量が減少することによると考えられる。

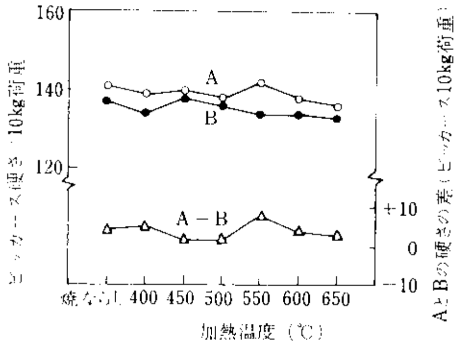


図 3 実験室溶製 RIVER TEN 50でのNb(B) あるいは Cu(A－B) による析出硬化

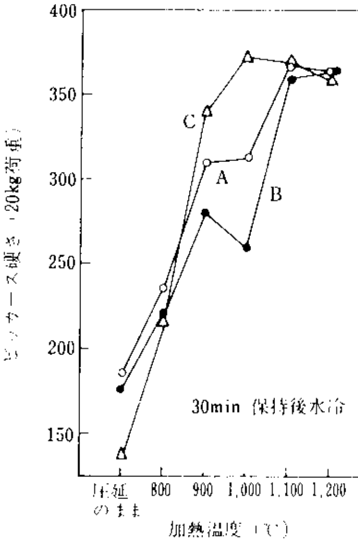


図 4 実験室溶製 RIVER TEN 50 の焼入硬化性

2・2　引張および曲げ特性

溶接構造用 RIVER TEN の引張および曲げ特性の一例を**表 3** に示す。各材料は所定の強度をもつとともに十分な延性を示しており，また曲げ特性も規定条件を満足している。

2・3　切欠靱性

2・3・1　衝撃試験

溶接構造用 RIVER TEN の衝撃特性の一例を

表 3　RIVER TENの引張および曲げ特性

規格	板厚 mm	記号	熱処理	方向	引張試験 降伏点 kg/mm²	引張試験 引張強さ kg/mm²	引張試験 伸び %	引張試験 降伏比 %	引張試験 試験片 JIS	曲げ試験 180°
RIVER TEN 41B, C	12	a	圧延のまま	L	31.0	43.4	28	71	1	0.5t 良
				C	31.1	43.0	30	72	1	
	25	b	圧延のまま	L	30.0	43.1	33	70	1	1.0t 良
				C	28.5	43.2	30	66	1	
	38	c	焼ならし	L	29.5	42.8	34	69	1	1.5t 良
				C	29.9	42.2	26	71	1	
RIVER TEN 50B, C	12	d	圧延のまま	L	45.1	56.4	36	80	5	0.5t 良
				C	43.9	56.0	36	78	5	
	25	e	圧延のまま	L	41.2	51.6	38	80	4	1.5t 良
				C	41.2	51.6	36	80	4	
	50	f	焼ならし	L	39.2	53.9	36	73	4	2.0t 良
				C	40.6	54.7	36	74	4	
RIVER TEN 53	38	g	圧延のまま	L	45.3	57.0	36	80	4	2.0t 良
				C	45.3	56.9	35	80	4	
RIVER TEN 58(62)	12	h	焼入	L	55.2	63.2	32	87	5	0.5t 良
			焼もどし	C	54.9	64.6	29	85	5	
	26	i	焼入	L	55.6	65.5	29	85	4	1.5t 良
			焼もどし	C	55.9	67.9	29	82	4	
	50	j	焼入	L	54.0	65.3	31	83	4	2.0t 良
			焼もどし	C	51.9	65.0	30	80	4	

表 4　RIVER TENの衝撃特性

規格	板厚 mm	記号	熱処理	方向	2 mm Vノッチ vTrE ℃	2 mm Vノッチ vTrs ℃	2 mm Vノッチ rTr ℃	2 mm Vノッチ vEo kg・m	2 mm Vノッチ vE −20 kg・m	プレスノッチ pTc ℃	5mm Uノッチ uTd ℃
RIVER TEN 41 B, C	25	b	圧延のまま	L	14	−25	−33	10.0	7.0	—	—
				C	16	−21	28	6.3	5.2	—	—
	38	c	焼ならし	L	−5	7	−40	7.4	5.3	—	—
				C	10	−1	−40	5.5	4.0	—	—
RIVER TEN 50	25	e	圧延のまま	L	−4	8	−55	8.9	7.4	—	—
				C	—	5	−51	6.9	5.8	—	—
	50	f	焼ならし	L	−53	−50	−80	20.3	19.7	−18	−120
				C	−43	33	76	18.8	17.7	−13	−120
RIVER TEN 53	38	g	圧延のまま	L	−29	−20	−62	14.9	13.4	−2	−90
				C	−12	−20	−56	10.8	8.3	−2	−100
RIVER TEN 58 (62)	26	i	焼入	L	−52	50	79	19.5	19.0	−25	−120
			焼もどし	C	−35	−40	79	13.0	10.9	−20	−105
	50	j	焼入	L	59	−52	−98	22.5	22.4	−20	−130
			焼もどし	C	−46	42	86	20.8	16.2	0	−140

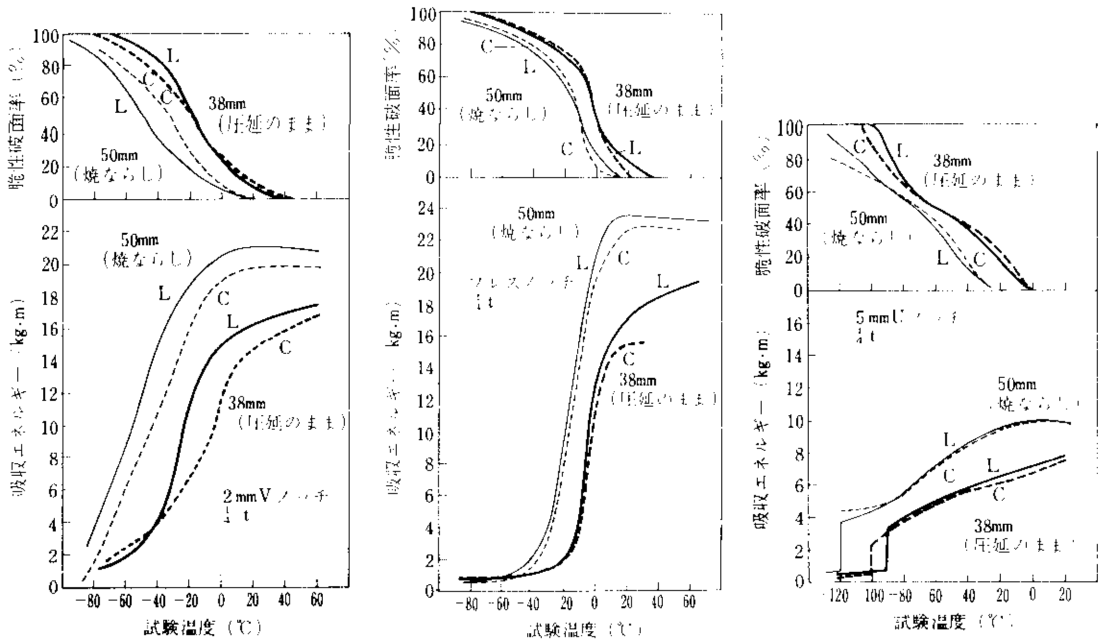


図 5 RIVER TEN 50のシャルピー衝撃試験結果

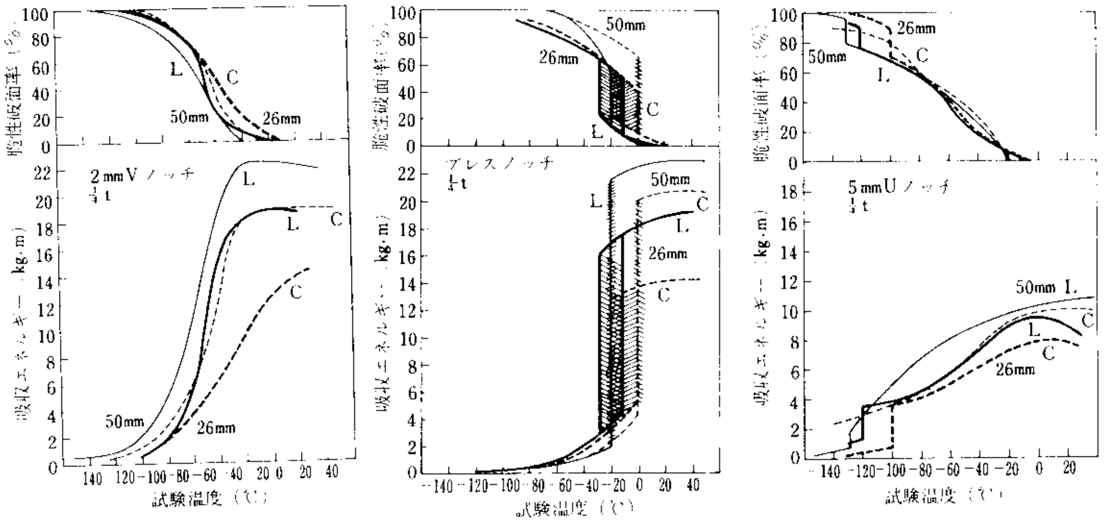


図 6 RIVER TEN 58のシャルピー衝撃試験結果

表4に示す。また**図5**，**図6**に，50，58kg/mm² 級について，2mmV，プレスおよび5mmUノッチシャルピー試験の遷移曲線を示す。50kg/mm² 級の材料はいずれもJISのSMA 50B, C, WESのHW 36の性能を，また58kg/mm²級のものもSMA58, HW50の性能を十分満足している。

2・3・2 ひずみ時効試験

RIVER TEN 50の50mm材（焼ならし）と38mm材（圧延のまま）およびRIVER TEN 58

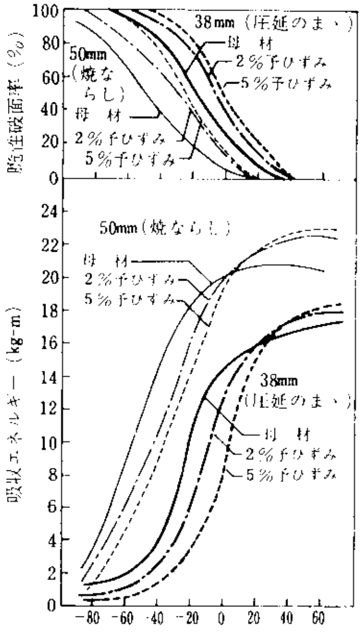


図 7　RIVER TEN 50の250°C, 1h/25mm ひずみ時効試験結果

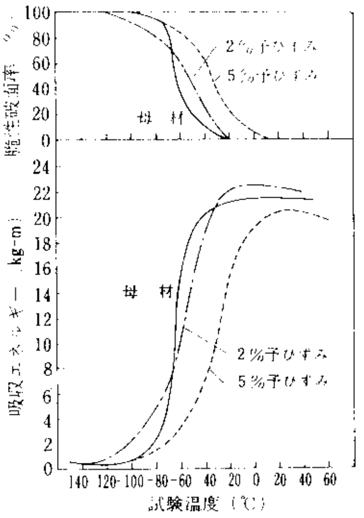


図 8　RIVER TEN 58の250°C 1h/25mm ひずみ時効試験結果

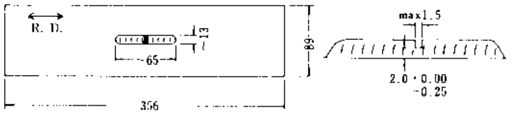


図 9　NRL落重試験片

の26mm材（焼入焼もどし）について，2%と5%の引張ひずみを与え，ついで250°Cで板厚25mmにつき1hの割合で加熱時効させたのち，引張軸と平行に採取した試験片を用いて行なったVノッチシャルピー試験結果を図7，図8に示す。各材料ともに5%のひずみ時効を与えても JIS および WES規格を満足している。

2･3･3　NRL 落重試験

脆性亀裂の発生特性をNRL落重試験によって調査した。25mmに減厚した図9に示す試験片を所定温度に冷却したのち，135kg･m の打撃エネルギーを与えたときのクラックの発生伝播状況を表5に示す。RIVER TEN 50, 53および58 (62)

表 5　RIVER TEN 50, 53, 53, (62) のNRL落重試験結果

試験温度 °C	RIVER TEN 50 (f) 50mm 焼ならし	RIVER TEN 53 (g) 38mm 圧延のまま	RIVER TEN 58(62) (i) 26mm 焼入焼もどし	RIVER TEN 58(62) (j) 50mm 焼入焼もどし
−10	―	―	―	○ ○
−15	○ ⦶ ⦶ (8 5 6 14)	―	―	○ ○ ○
−20	⦶ ○ ⦶ (6 5, 7 5)	⦶ ⦶ ⦶ (9 7, 6 6, 10 12)	○ ○ ○	⦶ ⦶ ⦶ (0 0, 0 5, 2 4)
−25	⦶ ● ● (23 22)	⦶ ⦶ ⦶ (14 15, 16 13, 14 11)	○ ○ ○	⦶ ◑ ◑ ◑ ● ● (6 4, 5, 9, 10)
−30	● ● ●	◑ ● ⦶ (26, 28 27)	○ ○ ◑ ◑ ● ● (12, 25)	● ● ●
−35	● ● ●	● ● ●	● ● ●	―
−40	―	● ● ●	● ● ●	● ● ●
N.D.T	−25°C	−30°C	−30°C	−25°C

○ 亀裂なし　⦶ 一部亀裂（亀裂長さ）　◑ 片側破断　● 破断

のNDT温度はいずれも−25〜−30°Cである。

2·3·4　二重引張試験

大型構造物での脆性亀裂停止特性を知るため板厚26mmのRIVER TEN 62について図10の大型試験片を用い，温度勾配つきと一様温度型の二重引張試験を行ない，亀裂伝播の限界条件を求めた。図11にKc値（$Kc=\sigma\sqrt{c}$：　σ=修正付加応力，c=亀裂長さ）と温度の関係を，また図12に亀裂長さを10mmおよび100mmとしたときの亀裂停止限界曲線を示す。WES規格低温構造用鋼板材質判定基準によるA種（c=100mm）としての使用温度は−36°C，G種（c=10mm）であれば−74°Cとなる。

2·4　高温引張特性

RIVER TEN 50および58の直径10mm，標点距離25mmのJISの標準試験片を用いて行なった高温引張試験結果を図13，図14に示す。これより400°Cまで強さはほとんど低下しないことがわかる。

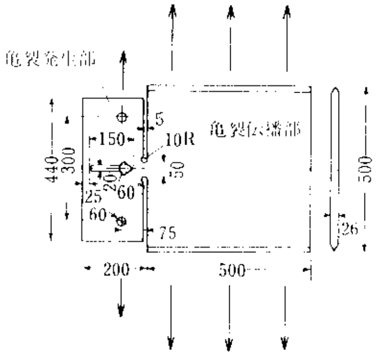


図 10　二重引張試験片

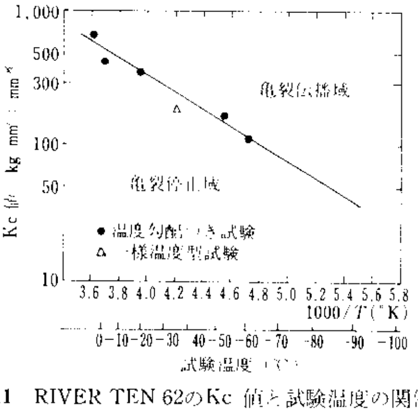


図 11　RIVER TEN 62のKc値と試験温度の関係

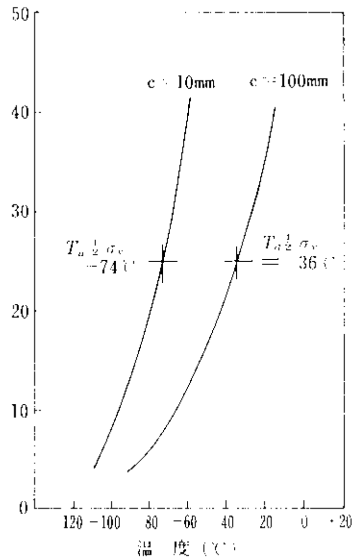


図 12　RIVER TEN 62の亀裂停止限界曲線

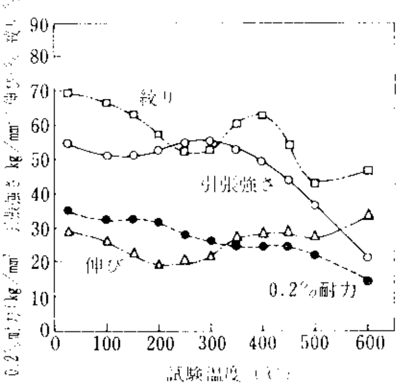


図 13　RIVER TEN 50の高温引張試験結果

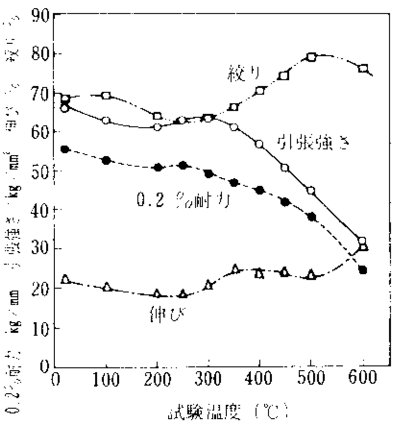


図 14　RIVER TEN 58の高温引張試験結果

2・5　疲労特性

RIVER TEN 50および58についてローゼンハウゼン型疲労試験機（666 cpm）により図15に示す原厚のままの母材，手溶接によるX開先突合せ継手の余盛削除および余盛つきの試験片を用いて片振り引張疲労試験を行なった。溶接棒は50kg/mm²級の材料についてはKS−76Cu, 58kg/mm²級にはKS−85Cuを使用した。図16と図17に示す結果より両鋼とも引張強さに対する耐久限度比は母材で65%以上，余盛つき継手試験片でおよそ35%となる。

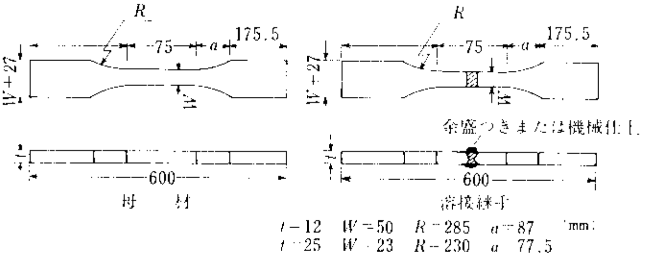


図 15　母材と溶接継手の片振り引張疲労試験片

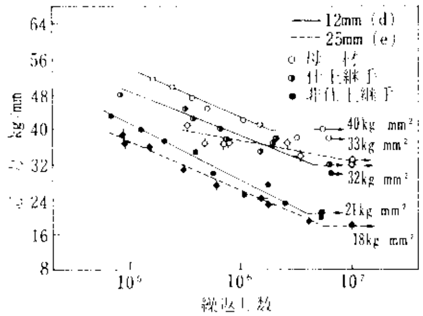


図 16　RIVER TEN 50の片振り引張疲労試験結果

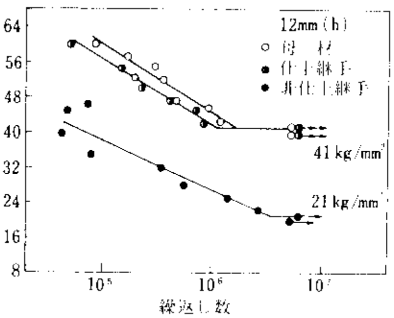


図 17　RIVER TEN 58の片振り引張疲労試験結果

3. RIVER TEN の溶接性

RIVER TEN の溶接は，一般構造用鋼のそれとなんら異なることなく，溶接性判定には下記の項目を検討すれば十分である。

(1)　溶接熱影響部の性質変化
(2)　溶接割れ
(3)　溶接部および母材の切欠靱性
(4)　溶接部を含めた延性

溶接熱影響部の硬化性は，JIS で規定される溶接熱影響部最高硬さ（Hmax）試験やWESのテーパー硬さ試験で判定され，ビード下割れ，切欠靱性，延性などに大きな影響をおよぼす重要な要因であって，溶接部の冷却速度や母材組成より計算したC当量に依存している。WESではC当量（Ceq）として

$$Ceq = C + {}^1/_6Mn + {}^1/_{24}Si + {}^1/_{40}Ni + {}^1/_5Cr + {}^1/_4Mo + {}^1/_{14}V\ (\%)$$

の計算式を採用している。

溶接割れは，その発生する位置により，溶着金属割れと熱影響部割れに大別されるが，後者にはビード下割れ，止端割れ，ルート割れ，ラミネーション割れなどがある。いずれも溶接熱サイクルを受けて変化した母材組織と溶接による応力サイクルとにより発生するものである。

切欠などの欠陥が存在しやすい溶接構造物では溶着金属，熱影響部，母材を含めた各部分の切欠靱性をかならず考慮せねばならない。試験法としては衝撃試験，切欠曲げ試験，切欠引張試験など，試験片の大きさや応力負荷方法の変わったものが種々考えられている。

溶接構造物では集中応力が延性によって緩和されないとき，割れ発生や脆性破壊につながることがあるので延性は溶接部全体に対して要求され，これを判定するためにビード曲げ試験やキンゼル試験などが行なわれる。

3・1　溶接熱による組織変化

鋼板を溶接したとき，注意しなければならない

のは溶接熱による鋼板の組織と機械的性質の変化である。ボンド部は鋼板の融点近くまで急熱され，さらに急冷されるため，組織とくに結晶粒度が変化して，鋼板としてすぐれた材料でもこの部分の性能は劣化することがある。

溶接熱影響による鋼板組織の変化を示す連続冷却変態図（ＣＣＴ図）を作成し，それに溶接後の冷却速度をあてはめて最適冷却速度，したがって

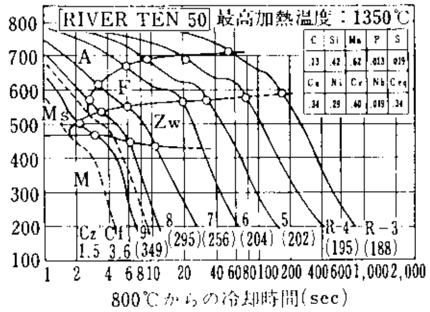


図 18　RIVER TEN 50の連続冷却変態図

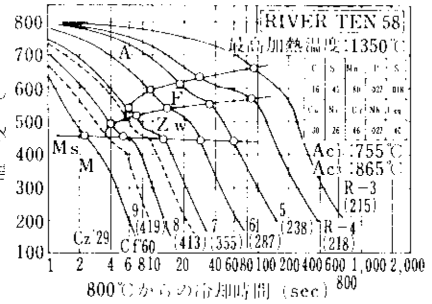


図 19　RIVER TEN 58の連続冷却変態図

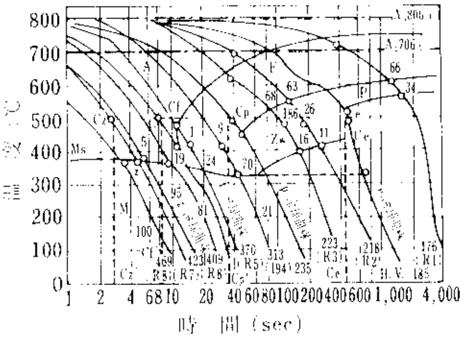


図 20　ＨＴ50の連続冷却変態図[4)]

表 6　臨界冷却速度 Cz′ Cf′

鋼　　種	C_z′ (sec)	C_f′ (sec)
RIVER TEN　50	1.5	3.6
RIVER TEN　58	2.9	6.0
ＨＴ　50	2.9	8.4

最適溶接条件を推定することができる。

RIVER TEN 50, 58のＣＣＴ図を**図18**と**19**に，また比較のため普通鋼材ＨＴ 50のそれを**図20**[4)]に示し，それより求めた中間段階組織とフェライトの析出する臨界冷却速度 Cz′, Cf′ の値を**表 6**にまとめた。

ＣＣＴ図作成時の試験片を利用して求めた冷却速度と硬さとの関係が**図21**であり，横軸の冷却速度は**図22**に一例を示す稲垣[5)]らによるノモグラフを用いて板厚，予熱温度，溶接入熱量などの溶接条件と関連づけることができる。

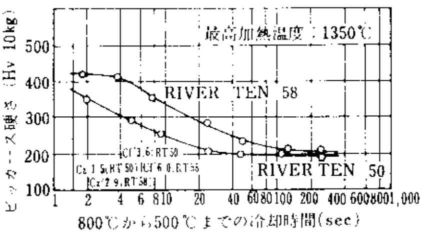


図 21　RIVER TEN 50, 58の800°Cから500°Cまでの冷却時間とかたさの関係

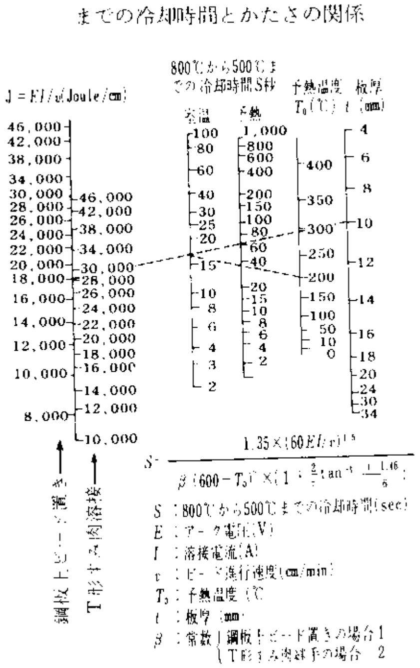


図 22　被覆アーク溶接の場合の冷却時間を推定するためのノモグラフ[5)]

3･2　硬化性試験

溶接部の最高硬さはふつうボンド近傍にあり，

Hmax と Ceq との間には一般に直線関係が成立し，次式であらわされる。

Hmax(VHN10kg)=(666×%Ceq+40)±40

いっぽうWESでは Hmax と Ceq について鋼種ごとに規定値を設けており，たとえばHW 50では Hmax=415以下，Ceq=0.54%以下である。したがって溶接条件の選定にあたっては，まず図19の冷却速度による硬さ変化，または後述するテーパー硬さ試験の結果から，規定硬さ以下になる冷却速度の上限値を求め，さらに図22のノモグラフを用いて，溶接入熱を与えれば必要な予熱条件を定めることができる。

図19は再現溶接熱サイクルによる冷却速度と硬さ変化の関係であるが，つぎに実際に RIVER TEN 50，58を溶接して，テーパー硬さ試験を行なった。

ここでは溶接棒としては強度の対応したKS―76Cu，KS―86Cu を用い，図23に示す試験片，溶接条件により溶接した。

図24～26に冷却速度とHmaxとの関係を示し，表7にその特性値をまとめた。JIS の最高硬さに相当する値は各鋼種とも 330 ～ 340 Hv であり，RIVER TEN の硬化性は同強度の一般の構造用鋼にくらべて決して高くない。

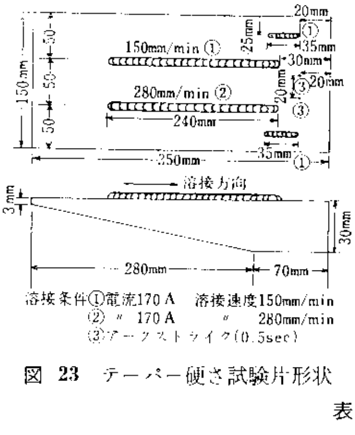


図 23　テーパー硬さ試験片形状

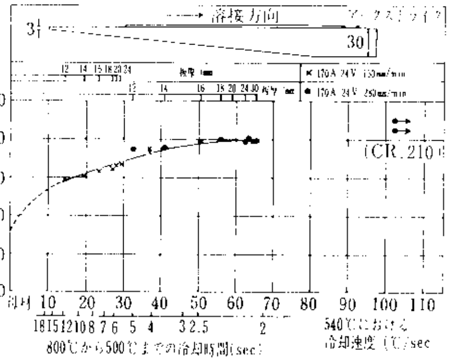


図 24　RIVER TEN 50，板厚38mmのテーパー硬さ試験結果

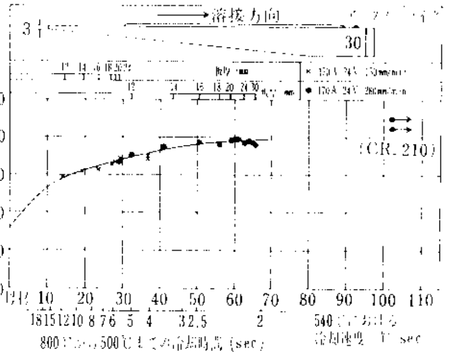


図 25　RIVER TEN 50，板厚50mmのテーパー硬さ試験結果

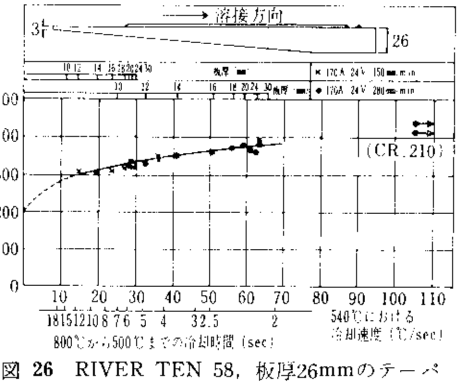


図 26　RIVER TEN 58，板厚26mmのテーパー硬さ試験結果

表 7　テーパー硬さ試験結果

鋼　　種	板　厚 (mm)	540℃におけるボンドの冷却速度が28/secに相当する硬さ (Hv)	Hv=350に相当するボンド部の540℃における冷却速度 (℃/sec)	Hv=350に相当するボンドの800℃から500℃までの冷却時間 (sec)
RIVER TEN 50	38	341	31	-
	50	338	33	-
RIVER TEN 58	26	328	42	3.5

3・3 溶接割れ試験

溶接熱影響部の割れ感受性を判定するために y 開先拘束割れ試験を行なった。

図27に示す試験片の温度をかえ，溶接棒は 350 °C で 1 h 再乾燥して下記の条件で溶接した。検査方法を図28に示す。

溶接電流　(170±10) A
溶接速度　150mm/min
予熱温度　RIVER TEN 50…室温，50，75，100，125°C
　　　　　RIVER TEN 58…0，20，50，75，100°C

図29と表 8 に結果をまとめて示すが，ルート割れの発生を阻止するために必要な予熱温度は RIVER TEN 50 の板厚50mm，38mmでは100°C であり，RIVER TEN 58 の板厚 26 mm では室温で溶接しても割れは発生しない。

耐割れ性においても RIVER TEN は一般構造用鋼にくらべて良好である。

3・4 ビード曲げ試験

図30に示す試験片を予熱して溶接ビードを置き

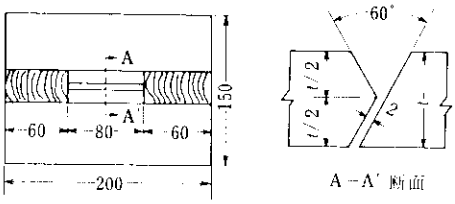


図 27 y開先拘束割れ試験片形状

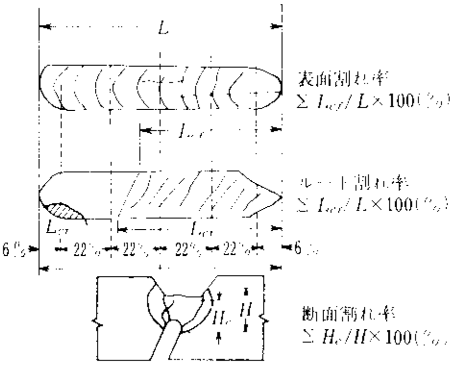


図 28 割れ検査法および表示法

一週間放置してから曲げ試験を，室温で，また一部のものは0°C でも行なった。なおRIVER TEN 50はビード面を残して片面から厚さ 25mmに減厚して試験した。

また母材を室温で曲げたときの角度と局部表面伸びとの関係を標点距離 5 mm で求め，これを図31に示す。

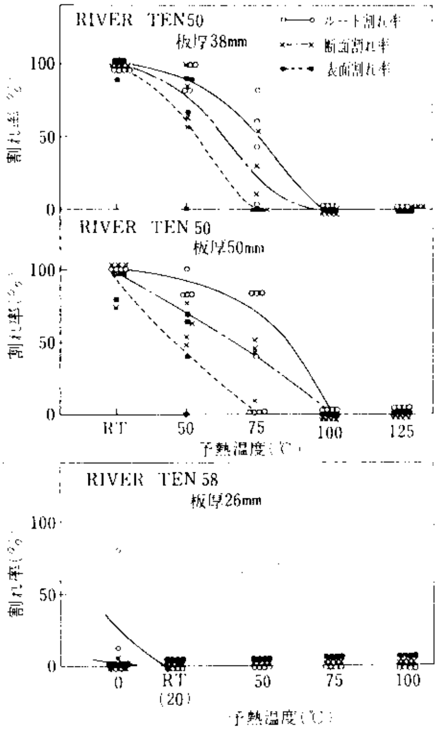


図 29 y開先拘束割れ試験結果

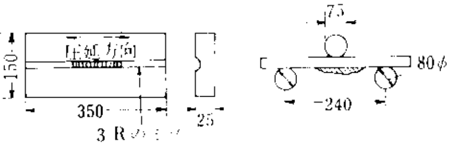


図 30 溶接ビード曲げ試験片および治具形状

表 8 y開先拘束割れ試験結果

鋼種	板厚 (mm)	表面割れ阻止温度	断面割れ阻止温度	ルート割れ阻止温度
RIVER TEN 50	38	75°C	100°C	100°C
	50	75°C	100°C	100°C
RIVER TEN 58	26	< 0°C	20°C	20°C

表9に示す試験結果では，各鋼種とも，ビード趾端より 2 mm だけ割れが進展したときの表面伸び率は30%を越えており，溶接部の曲げ延性は良好である。

3·5 溶接熱影響部の靱性

溶接熱影響の靱性を判定するためレ型開先突合せ溶接部の衝撃試験，さらに RIVER TEN 58 については大型試験としてディープノッチ試験を行なった。

3·5·1 レ型開先衝撃試験

溶接条件は

電流：160～180 A

予熱，層間温度：50°C（RIVER TEN 50）

75°C（RIVER TEN 58）

で行ない，その開先形状とノッチ位置を図32に示す。

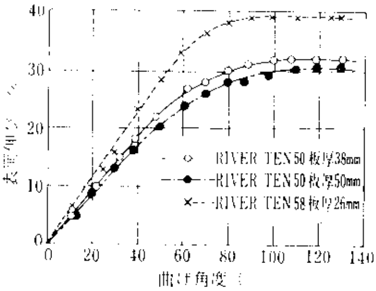


図 31　RIVER TEN の曲げ角度と表面伸び率の関係

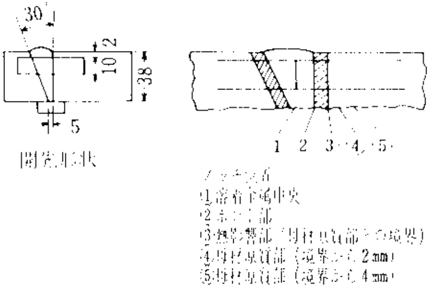


図 32　開先形状およびノッチ位置

表 9　ビード曲げ試験結果

鋼種	板厚 (mm)	予熱温度 (°C)	試験温度 (°C)	初期亀裂 曲げ角度(°)	初期亀裂 表面伸び(%)	初期亀裂 亀裂発生場所	割れ伝播 曲げ角度(°)	割れ伝播 表面伸び(%)
RIVER TEN 50	38	R. T	R. T	> 120			> 120	
				> 120			> 120	
			0	> 120			> 120	
				114	32	[illegible]	> 120	
			−20	> 120			> 120	
				> 120			> 120	
		50	R. T	> 120			> 120	
				109	32	[illegible]	> 120	
		75	R. T	> 120			> 120	
				> 120			> 120	
		100	R. T	> 120			> 120	
				> 120			> 120	
			0	> 120			> 120	
				> 120			> 120	
			−20	> 120			> 120	
				> 120			> 120	
	50	R. T	R. T	> 120			> 120	
				> 120			> 120	
			0	> 120			> 120	
				115	30	[illegible]	> 120	
			20	> 120			> 120	
				114	30	[illegible]	> 120	
		50	R. T	> 120			> 120	
				116	30	[illegible]	> 120	
		75	R. T	> 120			> 120	
				> 120			> 120	
		100	R. T	> 120			> 120	
				> 120			> 120	
			0	> 120			> 120	
				> 120			> 120	
			−20	> 120			> 120	
				> 120			> 120	
RIVER TEN 58	26	R. T	R. T	69	37	[illegible]	83	39
				64	35.5	[illegible]	> 120	> 39.5
			0	> 120	39.5		> 120	> 39.5
				87	39	[illegible]	> 120	> 39.5
			20	43	24.5	[illegible]	48	27.5
				55	31.5	[illegible]	66	36
		50	R. T	74	38	[illegible]	> 120	> 39.5
				78	38.5	[illegible]	> 120	> 39.5
			0	97	39	[illegible]	> 120	> 39.5
				63	35	[illegible]	> 120	> 39.5
			20	66	36	[illegible]	> 120	> 39.5
				53	30.5	[illegible]	> 120	> 39.5
		75	R. T	> 120	> 39.5		> 120	> 39.5
				> 120	> 39.5		> 120	> 39.5
		100	R. T	78	38.5	[illegible]	> 120	> 39.5
				> 120	> 39.5		> 120	> 39.5

溶接部各位置におけるシャルピー衝撃試験結果を**図33～35**に示し，またそこに応力除去焼なましを行なったときの結果も付記した。

ボンド部の脆化はほとんど認められず，規格値を十分上まわる値を示している。

3・5・2　ディープノッチ試験

開先形状と溶接条件を**表10**に，試験片形状を図**36**に示す。

亀裂長さと脆性破壊発生温度（B.F.I. Temperature）との関係を**図37**に示す。また，各入熱量における溶接金属とボンド部の B.F.I. 温度を½亀

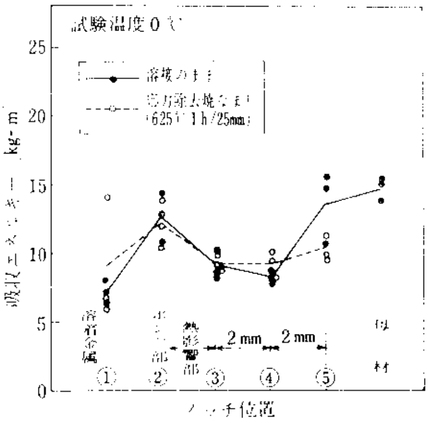


図33　RIVER TEN 50, 板厚38mmの溶接熱影響部衝撃試験結果

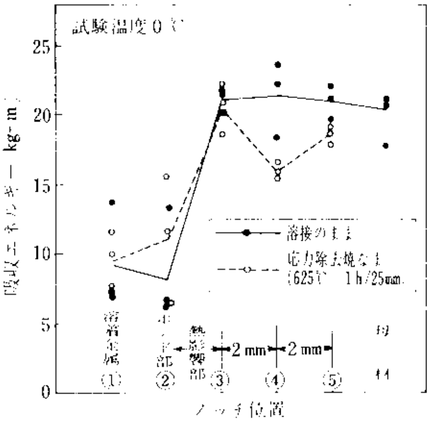
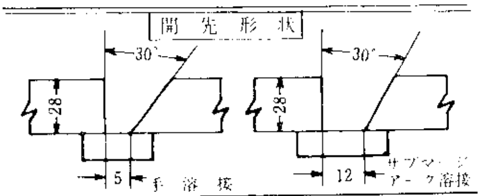


図34　RIVER TEN 50, 板厚50mmの溶接熱影響部衝撃試験結果

表10　開先形状および溶接条件



溶接条件	溶接材料	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/min)	入熱量 (Joule/cm)	層間温度 (℃)
手溶接	KS-86Cu	160	25	16	15,000	100
サブマージアーク溶接	KW 43	750	34	34	45,000	250
	×KB-60Cu	1,100	36	26	91,000	250

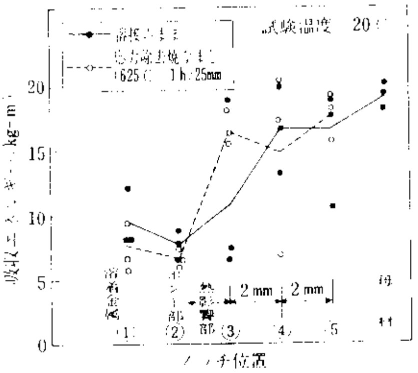


図35　RIVER TEN 58, 板厚26mmの溶接熱影響部衝撃試験結果

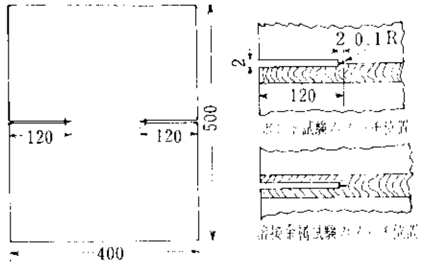


図36　ディープノッチ試験片形状

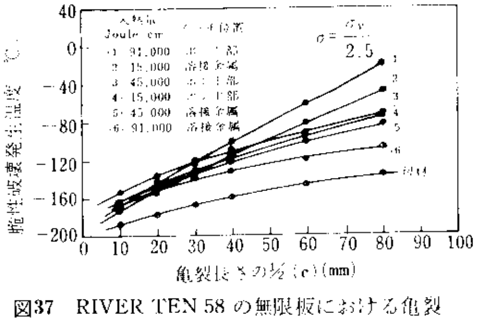


図37　RIVER TEN 58 の無限板における亀裂長さと脆性破壊発生温度の関係

表11　脆性破壊発生温度$\left(\sigma = \frac{\sigma y}{2.5},\ c = 40\right)$

入熱量 (Joule/cm)	ノッチ位置	脆性破壊発生温度 (℃)
—	母　　材	−159
15,000	Bond部	117
	溶接金属	114
45,000	Bond部	110
	溶接金属	−154
91,000	Bond部	104
	溶接金属	133

裂長さ(c)＝40mmについて求めた結果を**表11**にまとめた。安全率を2.5にとれば無限板中に80mmの亀裂があるときに脆性破壊が発生する温度は，入熱量91,000Joule/cmを与えた場合でも－100°C以下であり，衝撃試験結果ともあわせて，熱影響部の靱性は良好であるといえる。

3·6　溶接性におよぼす添加元素の影響

溶接性に対するCu，Nbの影響を調べるために2.2に前述した実験室溶製のCu，Nb添加材（A鋼）とNb添加材（B鋼），それにCu，Nb無添加の比較材（C鋼）をKS－76Cuで溶接して試験した。

JISに定める方法に準じて8×75×200mmの大きさの試験片で求めた溶接最高硬さを**表12**に示す。標準入熱量19,000Joule/cmのほか，板厚が薄いので，板厚25mmの硬化能を推定するために，ノモグラフから求めた入熱量7,520Joule/cmのときの試験をもあわせて行なった。

NbとCuの添加でHmaxは約20，Nbの単独添加では約10の硬さ増加があるが，これは強度レベルが10kg/mm²高い材料での増加率としてはかなり低い。

つぎにX開先をとった試験板を170A，25V，170mm/minの条件で溶接した継手の引張，曲げ試験結果を**表13**に示す。溶接のままと応力除去焼なましをしたものについて，JIS 5号引張試験片とJIS A 3号に準じた曲げ試験片（幅38mm）を用いた。引張試験では各試験片とも母材で破断し，

表12　実験室溶製 RIVER TEN 50，板厚8mmの溶接最高硬さ

溶接条件	入熱 Joule/cm	H max（ビッカース硬さ10kg荷重）		
		A（Cu Nb）	B（Nb）	C（Cu, Nbなし）
		Ceq＝0.333	Ceq＝0.324	Ceq＝0.331
25V·170A·340mm/min	7,520	246	230	222
25V·170A·135mm/min	19,000	218	215	198

表13　実験室溶製 RIVER TEN 50の溶接継手引張および型曲げ試験結果

鋼　材	熱処理	引張試験（JIS 5号）				型曲げ試験 180°
		降伏点 kg/mm²	引張強さ kg/mm²	伸び％ G.L＝50mm	破断位置	
A (Cu－Nb)	母　材	44.5	56.1	36		良
	溶接のまま	45.9	55.4	27	母材	良
	応力除去焼なまし	42.1	54.4	27	母材	良
B (Nb)	母　材	44.8	54.9	35		良
	溶接のまま	44.0	54.9	28	母材	良
	応力除去焼なまし	42.6	54.3	28	母材	良
C (Cu, Nbなし)	母　材	32.3	46.3	43		良
	溶接のまま	33.1	47.8	30	母材	良
	応力除去焼なまし	31.0	46.9	31	母材	良

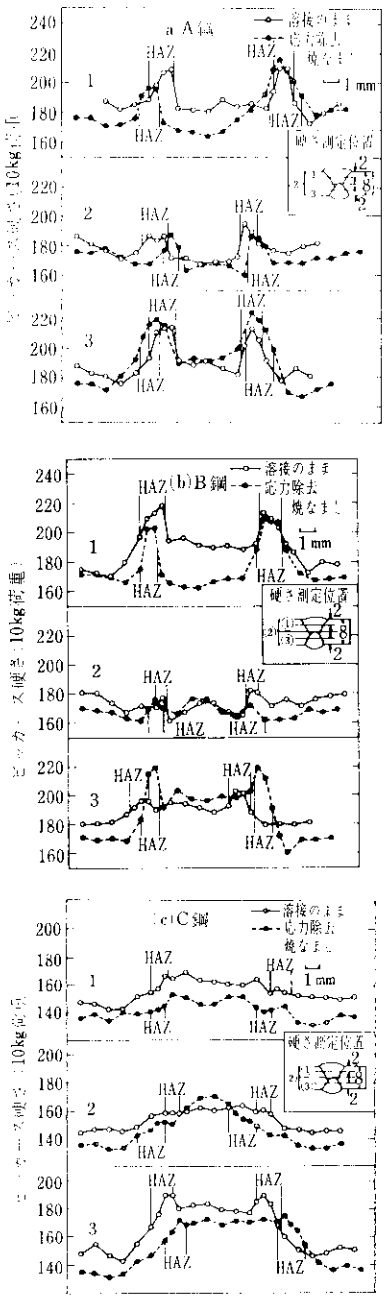


図 38　実験室溶製 RIVER TEN 50の継手横断面の硬さ分布

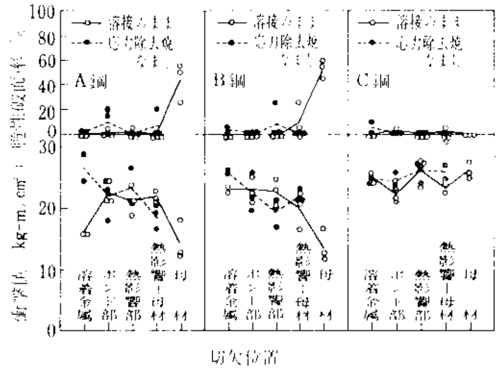


図 39　実験室溶製 RIVER TEN 50の溶接部のシャルピー衝撃試験結果（サブサイズ 5 mm）

熱影響部を含み溶接部は問題がない。型曲げ試験結果もすべて良好である。

継手横断面の硬さ分布を図38 (a), (b), (c)に示す。板厚が薄いためもあって熱影響部の硬化は少なく，Cu, Nb を添加していないC鋼ではむしろ溶接金属の方が硬くなっている。

溶接継手各部のサブサイズ試験片による 2 mm Vノッチシャルピー衝撃試験を，溶接のままと応力除去焼なまし後のものについて 0 °C で行なった結果を図39に示す。

Nb, Cuを添加したことによる劣化は溶接金属，ボンド部，熱影響部のいずれにも認められない。

5. 総　括

耐候性溶接構造用鋼板（RIVER TEN）の機械的性質と溶接性について概述した。引張強さ 50kg/mm² 以上のRIVER TENはNbを含んでいることが特徴であり，機械的性質と溶接性の面でその効果がみとめられている。各鋼材はもちろん耐候性を有するとともに溶接構造用鋼板として必要な特性をかねそなえた鋼材であり，50, 62kg/mm² 級の材料はそれぞれWESのHW 36, 50として認定されている。

参考文献

1) H. A. Wriedt & L. S. Darken : Trans. AIME, **218** (1960), 30
2) たとえば E. Hornbogen & R. C. Glenn : Trans. AIME, **218** (1960), 1064
3) たとえば W. B. Morrison : J. Iron & Steel Inst., **201** (1963), 317
4) 鈴木ほか：溶接冶金，(1963)，99
5) 溶接学会編：溶接便覧（新版），(1966)，726