

## 溶接金属の韌性に及ぼす溶接条件の影響 (その1 目的と試験概要ならびに試験結果)

正会員 ○平井慶一\*1 正会員 竹内秀紀\*2 正会員 後藤和正\*3  
 同 藤田哲也\*4 同 加賀美安男\*5 同 米山真一朗\*6  
 同 岡野昌明\*7 同 横田泰之\*8

溶接金属 溶接条件 シャルピー吸収エネルギー  
脆性破面率 遷移曲線

### 1. はじめに

著者らはこれまでの研究<sup>1)~4)</sup>で、溶接金属の力学的性能に及ぼす溶接条件の影響を明らかにする取り組みを行ってきた。引張強さについては、所定の規格引張強さの鋼材に対して、適用する溶接材料に応じた溶接条件を提示することができた。一方、韌性については、その影響する要因が溶接条件以外にも存在し、シャルピー衝撃試験の試験結果のばらつきも大きいことから、溶接条件との関係を明確に示すことができなかった。特に、シャルピー衝撃試験温度が遷移温度に近い場合には、遷移曲線が急勾配のエリアになるため、より結果がばらつきやすく、正確なデータが得られにくい。

そこで本稿では、1種類の溶接ワイヤにより、3種類の溶接条件で試験体を作製し、溶接条件毎に4温度でシャルピー衝撃試験を行い、遷移曲線を求めて得られる吸収エネルギー値により、溶接条件と韌性の関係を求める目的とした。

### 2. 試験方法

試験体は板厚19mm(TMCP385B)長さ500mmで20°V形開先(裏当金付き)の完全溶込み溶接の突合せ継手とした。溶接材料はソリッドワイヤ(JIS Z 3312 YGW18)Φ1.2mmとした。試験体概要を表1に示す。

溶接条件を表2に示す。いずれの条件においても自動溶接機により溶接電流・電圧は一定とし、溶接速度を変動させて入熱量を調整した。また、溶接は4層4パスとし、各パスの溶接条件は一定で、入熱量による溶接量の変動は開先幅で調整した。溶接時には各パスの電流および電圧をデータロガーにより連続して記録した。

実施した試験概要を表3に示す。ハーフサイズのシャルピー衝撃試験は、溶接金属の原質部での試験を目的として、再熱を受けにくい溶接最終層から試験片を採取した。ビッカース硬さ試験は、溶接金属の中央鉛直方向に板厚の範囲で1mmピッチ20点を測定した。

シャルピー衝撃試験(フルサイズ、ハーフサイズ)の試験片採取位置、化学成分分析位置、ビッカース硬さ試験測定位置を図1に示す。

表1 試験体概要

項目	詳細
鋼材	TMCP385B 板厚19mm 長さ500mm
溶接材料	ソリッドワイヤ(YGW18) Φ1.2mm
シールドガス	100%CO <sub>2</sub>
溶接姿勢	下向
積層法	4層4パス

表2 計画した溶接条件

	開先条件		溶接条件				
	開先角度(°)	ギャップ(mm)	電流(A)	電圧(V)	溶接速度(cm/min)	入熱(kJ/cm)	バス間温度(°C)
条件1(M20)	20	7	300	34	30	20	150
条件2(M30)	20	10	300	34	21	30	250
条件3(M40)	20	17	300	34	15	40	350

表3 試験項目と試験条件

試験項目	試験条件			
	M20	M30	M40	
溶接金属化学成分分析	C, Si, Mn, P, S, Mo, Ti, Al, B, O, N			
断面マクロ観察	各溶接条件1体ずつ			
シャルピー衝撃試験 JIS Z 3111 n=3	フルサイズ 温度(°C)	0 -40 -60 -80	+20 0 -20 -40	+20 0 -20 -40
ハーフサイズ 温度(°C)	0	0	0	
ビッカース硬さ試験 JIS Z 2244	マクロ試験体を用いて 溶接金属の中央鉛直方向に 板厚の範囲1mmピッチ20点			
ミクロ観察	衝撃試験片のノッチ底面で観察			

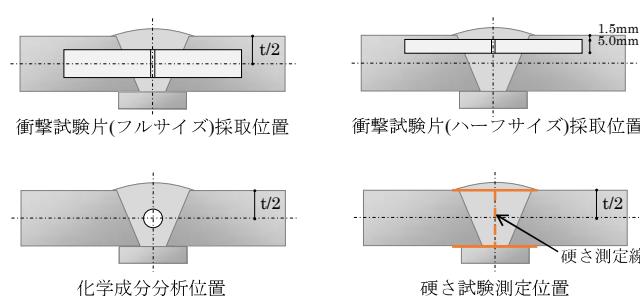


図1 試験片採取位置

### 3. 試験結果

【①溶接条件実施結果】 溶接条件実施結果を表 4 に示す。

【②溶接金属化学成分分析結果】 化学成分分析結果を表 5 に示す。いずれの条件においても窒素量は 50ppm 前後で安定し低く抑えることができ、酸素量も条件による変動はなく、400ppm 程度であった。マンガン (Mn) 、シリコン (Si) およびチタン (Ti) は、入熱量・パス間温度が高いほど少なくなる傾向があり、溶接条件により酸化で減量が生じたことと考えられる。特にチタンは、マンガンやシリコンと比較して溶接材料の含有量から大幅に減っており、これらの大半はスラグ (酸化物) として溶接金属から排出され、結果として溶接金属の酸素量が低く抑えられたと考えられる。

【③断面マクロ観察】 断面マクロ観察結果を写真 1 に示す。

【④シャルピー衝撃試験結果】 シャルピー衝撃試験結果を表 6、表 7 に示す。また、試験片破面写真の一例 (フルサイズ M30) を写真 2 に示す。脆性破面率は、同一試験温度において入熱量が大きく、パス間温度が高いほど、高くなる傾向が見られたが、吸収エネルギーは、同一試験温度において、入熱量・パス間温度の序列通りの結果とはならなかった。

【⑤硬さ試験結果】 硬さ試験結果を表 8 に示す。入熱量が大きく、パス間温度が高いほど、硬さは小さく (推定引張強さは低く) なる傾向が見られた。

### 4.まとめ

本稿では、本テーマの目的に加え、試験概要と試験結果の一部を説明した。その 2 では結果考察 (ミクロ観察結果含む) を報告する。

表 4 溶接条件実施結果 (全パス平均値)

条件	ロガー計測値		溶接速度 (cm/min)	入熱 (kJ/cm)	パス間温度 (℃)	冷却時間*(sec.)				
	電流(A)	電圧(V)					1	2	3	平均
M20	301	33.8	30.0	20.4	163	22.9				
M30	300	33.8	21.0	28.9	260	68.9				
M40	298	33.8	15.0	40.2	356	234.1				

\* 800°C~500°C の冷却時間を稲垣による実験式<sup>5)</sup>で求めた。

表 5 化学成分分析結果

条件	C	Si	Mn	P	S	Mo	Ti	Al	B	O	N
	(% / mass)								(ppm)		
M20	0.081	0.60	1.26	0.013	0.005	<0.005	0.042	0.004	0.0016	430	50
M30	0.078	0.58	1.20	0.013	0.005	<0.005	0.035	0.004	0.0015	420	49
M40	0.074	0.57	1.14	0.013	0.006	<0.005	0.028	0.002	0.0016	400	51
溶接材料	0.07	0.89	1.70	0.013	0.009	<0.01	0.18*	-	-	-	-
母材	0.14	0.35	1.33	0.008	0.001	0.00	-	-	0.0001	-	-

\* Ti+Zr

#### 【参考文献】

- 1) 松浦ら: 突合せ溶接部の溶接条件と溶接金属の性能その 1~2: 日本建築学会大会学術講演梗概集 2011 年
- 2) 加賀美ら: 溶接材料の化学成分による溶接金属の強度推定式: 日本建築学会大会学術講演梗概集 2012 年
- 3) 松浦ら: 550N/mm<sup>2</sup> 級および 590N/mm<sup>2</sup> 級鋼材に適用する溶接材料と溶接条件その 1~3: 日本建築学会大会学術講演梗概集 2013 年
- 4) 竹内ら: 立向溶接における溶接条件と溶接部の機械的性能その 1~3: 日本建築学会大会学術講演梗概集 2017 年
- 5) 溶接・接合技術概論 溶接学会編 産報出版発行

\*1 竹中工務店, \*2 安井建築設計事務所,

\*3 大成建設, \*4 日本設計, \*5 日建設計,

\*6 フジタ, \*7 鹿島建設, \*8 神戸製鋼所

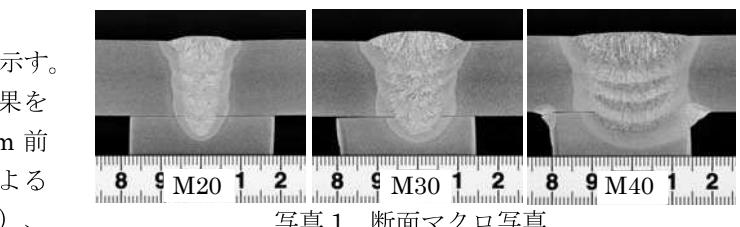


写真 1 断面マクロ写真

表 6 シャルピー衝撃試験結果 (フルサイズ)

条件	温度 (℃)	吸収エネルギー(J)				脆性破面率(%)			
		1	2	3	平均	1	2	3	平均
M20	0	152	158	161	157	10	6	6	7
	-40	98	96	108	101	38	31	34	34
	-60	56	77	43	59	53	49	56	53
	-80	18	19	18	18	79	74	79	77
M30	+20	152	165	149	155	33	21	23	25
	0	68	128	128	108	47	36	38	40
	-20	35	47	92	58	65	61	52	59
	-40	19	33	19	24	74	74	74	74
M40	+20	174	161	170	168	35	32	40	36
	0	160	118	155	144	43	54	47	48
	-20	79	82	90	84	68	68	68	68
	-40	11	14	15	13	94	94	83	90

表 7 シャルピー衝撃試験結果 (ハーフサイズ)

条件	温度 (℃)	吸収エネルギー(J)				脆性破面率(%)			
		1	2	3	平均	1	2	3	平均
M20	0	67	65	68	67	0	0	0	0
M30	0	75	77	69	74	8	1	9	6
M40	0	52	62	55	56	35	26	35	32

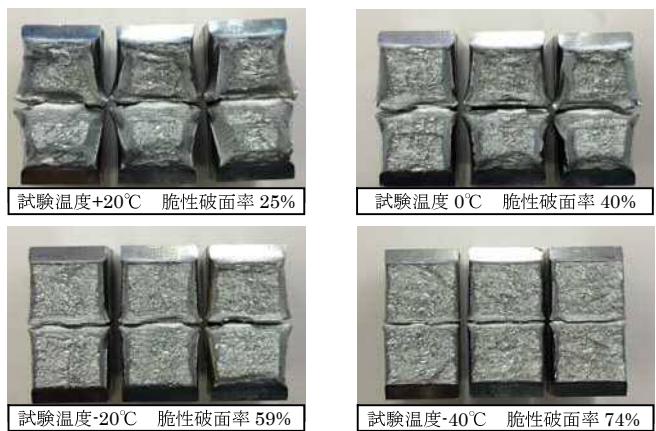


写真 2 衝撃試験片破面外観 (フルサイズ M30)

表 8 硬さ試験結果と推定引張強さ

条件	ビッカース硬さ Hv		推定引張強さ Ts=2.33Hv+117*(N/mm <sup>2</sup> )	
	板厚全域 平均	衝撃試験片域 平均	板厚全域 平均	衝撃試験片域 平均
M20	208.0	205.9	602	597
M30	181.4	176.6	540	528
M40	158.4	155.1	486	478

\* 引張強さの推定式は著者らの既往の研究<sup>4)</sup>による。

## 溶接金属の韌性に及ぼす溶接条件の影響 (その2 試験結果の分析および溶接管理条件)

正会員 ○加賀美安男\*1 正会員 竹内秀紀\*2 正会員 後藤和正\*3  
同 藤田哲也\*4 同 米山真一朗\*5 同 平井慶一\*6  
同 岡野昌明\*7 同 横田泰之\*8

ソリッドワイヤ 遷移温度 吸収エネルギー  
入熱・パス間温度 冷却時間

### 1. はじめに

本稿では、その1で報告したシャルピー衝撃試験の結果について考察する。初めに、0°C試験の吸収エネルギーに差が生じている要因を探るために、シャルピー衝撃試験片破断面位置の溶接金属組織を観察した。

次に試験温度を変化させて実施したシャルピー衝撃試験結果から遷移曲線および遷移温度を求めて、溶接条件による違いを確認する。また、求めた遷移曲線から溶接材料の所定の吸収エネルギー(0°C)を得る限界冷却時間を求める。

### 2. 溶接金属組織の観察

試験温度 0°Cの吸収エネルギーの差を確認するため、シャルピー衝撃試験を実施した試験片(各組試験片のNo.1)を用いて、図2に示す観察位置にて

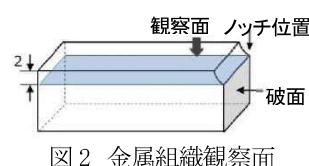


図2 金属組織観察面

溶接金属組織の観察を行った。各試験片の溶接金属組織を写真3に示す。

吸収エネルギーの個々値は、M20 > M40 > M30 の順となり、入熱・パス間温度の低い順とはならないが、原質部の試験片破面に占める割合は、M20 > M30 > M40 の順に減少し、入熱・パス間温度が高くなるほど減少している。

### 3. 原質部と再熱部の吸収エネルギー

シャルピー衝撃試験片(以下、フルサイズ試験片と称す)の採取位置における原質部と再熱部の比率が異なることにより吸収エネルギーに差があることから、各溶接条件の原質部からシャルピー衝撃試験片(以下、ハーフサイズ試験片と称す)を採取し、原質部のみの吸収エネルギー(その1表7)を得た。ハーフサイズ試験片の採取位置を写真4に示す。ハーフサイズ試験片の破面外観を写真5に示す。

原質部の吸収エネルギーは、M30 > M20 > M40 の順に小さくなり、入熱・パス間温度の大きさの順序と異なる結果となった。ハーフサイズ試験片から得た原質部の吸収エネルギーとフルサイズ試験片破面の原質部の占める比率から再熱部の吸収エネルギーを計算で求めた結果を表9に示す。M30は、フルサイズ試験の吸収エネルギーがハーフサイズ試験片から得た原質部の吸収エネルギーの2倍より低い結果だったため、再熱部の吸収エネルギーは計算不能とした。

計算で求めたM20およびM40の原質部と再熱部の吸収エ

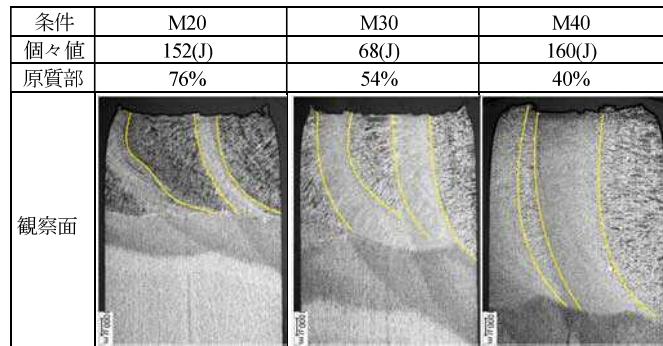


写真3 フルサイズ衝撃試験片ノッチ底近傍の溶接金属組織

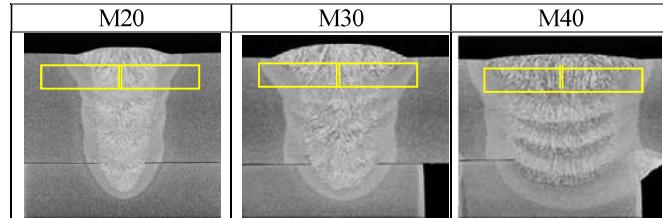


写真4 シャルピー衝撃試験片(ハーフサイズ)採取位置



写真5 シャルピー衝撃試験片(ハーフサイズ)の破面外観

表9 原質部・再熱部の吸収エネルギー(0°C)

条件	試験結果(0°C)		計算値	
	フル(J)	ハーフ(J)	原質部(J)/率(%)	再熱部(J)/率(%)
M20	152	67	134/76	209/24
M30	68	74	148/54	—/46
M40	160	56	112/40	192/60

(注)M30の再熱部吸収エネルギー「—」は計算不能を示す。

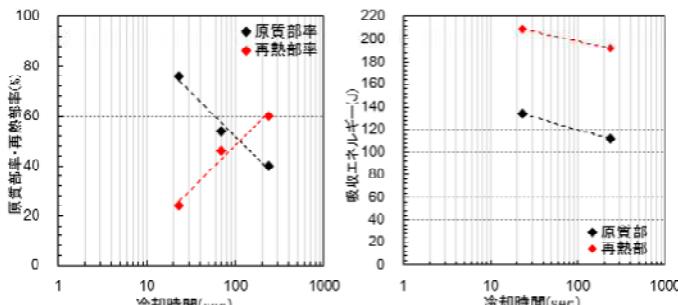


図3 原質部と再熱部の吸収エネルギーと冷却時間

エネルギーと冷却時間(その1 表4)の関係を図3(吸収エネルギーの図からM30は除いた)に示した。冷却時間が約100秒を超えるとフルサイズ試験片での再熱部の占める比率が原質部の占める比率を上回る。

#### 4. 遷移曲線による考察

その1で報告した4温度で実施したシャルピー衝撃試験結果を用いて、溶接条件ごとに遷移曲線を作成した。遷移曲線は、吸収エネルギーおよび脆性破面率と試験温度との関係を、溶接協会提案の遷移曲線<sup>1)</sup>(式1)で近似し、試験で得られたデータから上部棚エネルギー( $vE_{shelf}$ )、エネルギー遷移温度( $vT_E$ )、係数( $ka$ )を最小二乗法により求めた。

$$vE(T) = \frac{vE_{shelf}}{\exp(ka \times (T - vT_E)) + 1} \quad (\text{式1})$$

溶接条件ごとに求めた遷移曲線の諸定数を表10に、エネルギー遷移曲線および破面遷移曲線を図4に示す。破面遷移曲線から得られた破面遷移温度、遷移エネルギーおよび遷移曲線から求めた吸収エネルギー(0°C)を表11に示す。

破面遷移温度は、M20 < M30 < M40 の順で高くなり、遷移エネルギーも同様の順番で高くなつた。

試験温度0°Cでの吸収エネルギーはM20>M40>M30の順で、遷移エネルギーの大小関係とは異なる結果となった。これは、M20は遷移温度が-50°C以下であり、0°C付近では上部棚エネルギー付近となるための吸収エネルギーのはらつきは少ないが、M30およびM40では、遷移温度が-10°Cから0°C付近にあるため、JISで定める試験条件0°Cでの吸収エネルギーのはらつきが大きく、特にM30の衝撃試験の値が大きくばらついた結果と考えられる。

遷移曲線から求めた0°Cの吸収エネルギーと各溶接条件の冷却時間との関係を図5に示した。ここで、M30は異常値として除外し、M20とM40の結果から相関関係を求めた。この関係式では、所定の吸収エネルギー(例えば70J)を満足する冷却時間は約755secとなり、入熱50kJ/cm、パス間温度569°C、もしくは入熱40kJ/cm、パス間温度575°C等となる。いずれも、ガスシールドアーク溶接の通常の入熱・パス間温度の組合せ条件を超えている。この溶接材料銘柄においては、M20とM40の結果からは、通常の溶接条件で施工する範囲では吸収エネルギー70Jを下回ることはないと考えられる。

#### 5.まとめ

特定銘柄の溶接材料について、全パス同様の入熱・パス間温度の溶接条件にて試験体を作製し、溶接条件の違いによる吸収エネルギーの違いを確認した。

その結果、①シャルピー衝撃試験片のノッチ位置における原質部と再熱部に占める比率は、入熱・パス間温度が上昇するほど再熱部の占める比率が増える、②吸収エネルギーは、溶接条件によらず原質部よりも再熱部の方が大きい、③入熱・パス間温

度が上昇すると、再熱部の占める比率は増えるが、再熱部の吸収エネルギーが低下するため、結果として入熱・パス間温度が大きくなるほど吸収エネルギーが低下する、と考えられる。溶接金属の所定の吸収エネルギーを与える限界冷却時間は今回の試験では得られなかった。

本研究では、ソリッドワイヤの1銘柄について、吸収エネルギーと冷却時間の関係をもとに、所定の吸収エネルギーを与える冷却時間の関係を考察した。

異なる規格、異なる銘柄の溶接材料の溶接金属の吸収エネルギーと溶接条件との関係は、今後の検討課題である。

表10 遷移曲線の諸定数

条件	$vE_{shelf}(J)$	$vT_E(^{\circ}\text{C})$	$ka$
M20	165	-48.2	-0.0595
M30	200	-3.1	-0.0538
M40	219	-8.1	-0.0500

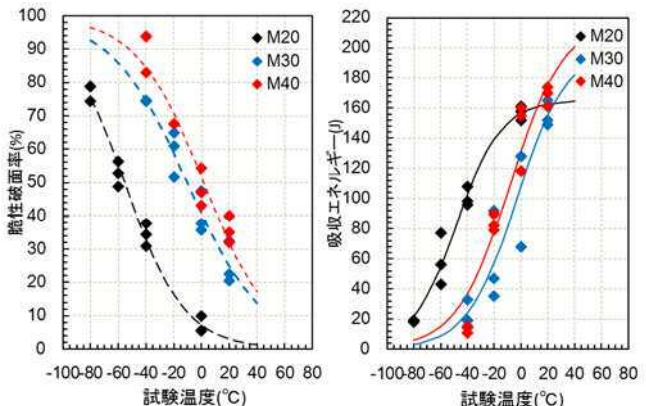


図4 衝撃試験の遷移曲線

表11 破面遷移温度および遷移エネルギー

条件	破面遷移温度(°C)	遷移エネルギー(J)	吸収エネルギー0°C(J)
M20	-55.5	65.2	157
M30	-10.3	91.2	108
M40	1.6	135.3	131

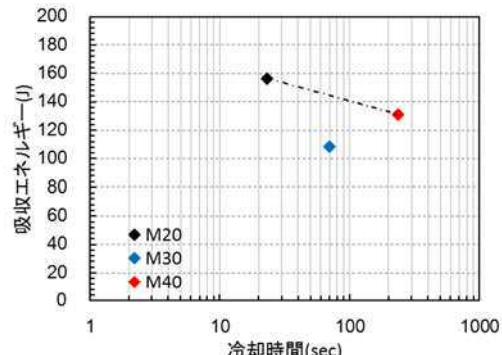


図5 冷却時間と吸収エネルギー

謝辞: 本研究はAW検定協議会研究評価委員会WG24として実施した。試験に際しご協力頂いた各位に謝意を表する。

参考文献:

1)WES 2808:2003 解説

\*1 日建設計、\*2 安井建築設計事務所、\*3 大成建設、  
\*4 日本設計、\*5,フジタ、\*6 竹中工務店、\*7 鹿島建設  
\*8 神戸製鋼所

\*1 Nikken sekkei Ltd, \*2 Yasui Architects INC, \*3 Taisei Corporation,  
\*4 Nihon Sekkei Inc, \*5 Fjita Co.Ltd, \*6 Takenaka, \*7 Kajima Co.Ltd  
\*8 KOBE STEEL, LTD.