

完全溶込み溶接における裏当て金鋼材の影響

(その1) 実験概要

正会員 ○大森貴之^{*1} 正会員 中込忠男^{*4}
同 見波 進^{*2} 同 山根正寛^{*5}
山下裕輔^{*3} 同 西澤 淳^{*6}

完全溶込み溶接 裏当て金 ビッカース硬さ
高強度鋼 窒素量 シャルピー衝撃値

1. はじめに

鋼構造完全溶込み溶接において、裏当て金は初層溶接の施工で発生する可能性がある「溶落ち」を回避できる厚さ・幅のものをを使用することを前提に、溶接性に支障を及ぼさない材質の鋼材を使用することが必要条件である。この裏当て金の材質について、母材と同材質にすることを特記している場合があるが、母材の板厚が40mm厚を超え490N/mm²級を超える鋼材(TMCP鋼、調質鋼)を使用している場合、母材と同材質である薄厚(9mm超え)の帯鋼を入手することは不可能であり、その場合の対応策は、母材と同一材(同厚)の裏当て金を使用するか、母材と同一材を薄肉切削加工した裏当て金を使用することとなりコスト等に影響を及ぼす。

本研究では、裏当て金の材質が溶接部に及ぼす影響を

実験的に確認し、現実的に対応できる施工要領の提案に要する資料を得ることを目的とし、実験を行った。

2. 実験方法

2.1 使用鋼材

母材は板厚40mmの高強度鋼を対象とし、基準強度385N/mm²の建築構造用550N/mm²級TMCP鋼材(以降TMCP385と称す)およびSA440とした。裏当て金には板厚9mmのSN490Bの高炉鋼板および窒素含有量の異なる2種類の電炉平鋼を用いた。表1にミルシート値を示す。

2.2 溶接試験体

溶接試験体の溶接方法を表2に、寸法を図1に示す。溶接試験体使用する裏当て金と母材の材質、開先形状の組合せを表3に示す。TMCP385、SA440の裏当て金は、母材と同一材から切削加工により製作した。開先形状は

表1 使用鋼材(ミルシート値)

	引張試験(N/mm ²)				シャルピー 衝撃値(J)	化学成分(%)															
	YP	TS	EL(%)	YR(%)		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	B	N	Ceq		
TMCP385	469	589	51	80	262	0.15	0.35	1.36	0.010	0.003	0.01	0.02	0.03	0.01	0	0.01	0	0.0030	0.40		
SA440B	495	644	30	77	270	0.12	0.22	1.48	0.008	0.001	0.23	0.17	0.02	0.17	0.045	0.005	0.0001	0.0037	0.43		
SN490B(高炉)	374	524	28	71.4	—	0.15	0.41	1.44	0.017	0.004	—	0.01	0.02	0.01	0.001	—	—	0.0026	0.41		
SN490B(電炉高N)	363	591	21	61.4	—	0.15	0.24	1.45	0.026	0.011	0.04	0.027	0.07	0.020	0.010	0.020	0.001	0.0138	0.42		
SN490B(電炉低N)	355	518	24	68.5	—	0.11	0.25	1.22	0.021	0.011	0.12	0.05	0.13	0.01	0.02	—	—	0.0096	0.35		
溶接ワイヤー	—	679	27	—	103	0.05	0.84	1.96	0.010	0.01	0.24	—	—	0.34	—	—	—	0.0045	—		

表2 溶接方法(MAG溶接)

溶接ワイヤーの種類	MG-60 φ1.4mm (JIS Z3312 G59JA1UC 3M1T)
シールドガス	炭酸ガス
入熱、パス間温度	30 kJ/cm以下, 250°C以下
積層法	3層7パス(60° V), 3層3or4パス(35° レ), 3層3パス(25° レ)
目標ビード高さ	15mm程度

裏当て金 9t×25×450 (SN490高N電炉材, SN490低N電炉材, SN490高炉材, TMCP385, SA440)

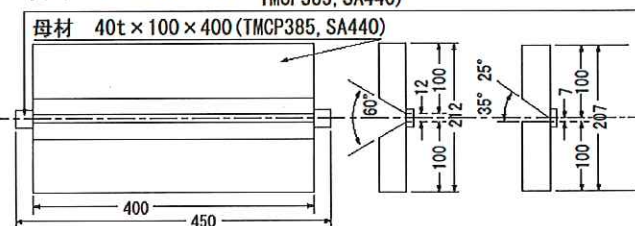


図1 溶接試験体

表3 裏当て金、母材、開先形状の組合せ

番号	裏当て金	母材	開先形状	個数	シャルピー	硬さ試験	化学成分	引張試験
①	SN490(電炉,低N)	TMCP385	60° V型	3	1	1	1	3
②			35° レ型	3	1	1	1	-
③			25° レ型	3	1	1	1	-
④	SN490(電炉,高N)	SA440	60° V型	3	1	1	1	3
⑤			35° レ型	3	1	1	1	-
⑥			25° レ型	3	1	1	1	-
⑦	SN490(高炉)	TMCP385	60° V型	3	1	1	1	3
⑧			35° レ型	3	1	1	1	-
⑨			25° レ型	3	1	1	1	-
⑩	TMCP385	SA440	60° V型	3	1	1	1	3
⑪			35° レ型	3	1	1	1	-
⑫			25° レ型	3	1	1	1	-
⑬	SA440	SA440	60° V型	3	1	1	1	3
⑭			35° レ型	3	1	1	1	-
⑮			25° レ型	3	1	1	1	-

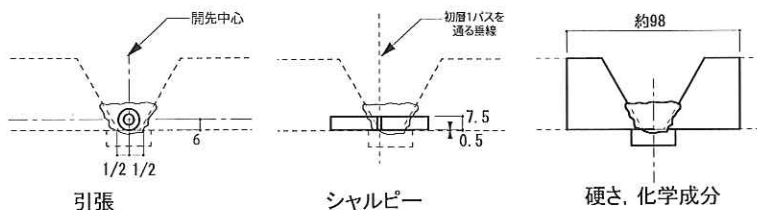
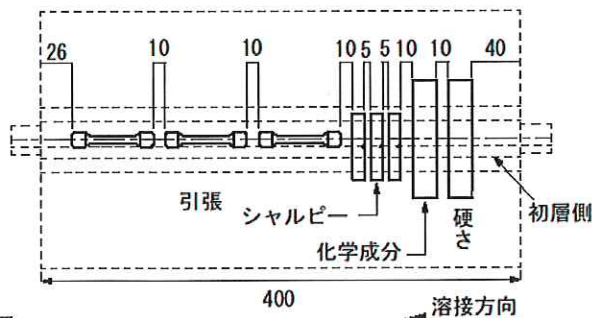


図2 試験片採取位置



Influence of backing metal on weld metal in full penetration joints

Part 1: Experimental outline

Takayuki Omori, Susumu Minami, Yusuke Yamashita, Tadao Nakagomi, Masahiro Yamane, Jun Nishizawa

2.3 試験片

(a) A2号引張試験片

(b) シャルピー衝撃試験片

(c) 化学成分分析試験片

(d) 硬さ試験片

図3 試験片形状

溶接金属部の窒素分析を行った（試験片形状は図 3(c)参照）．分析方法は，図 4 に示す溶接金属の断面位置の底辺（b 点）と上辺（a 点）の近傍の 2 箇所と第 1 パス（裏当て金内，c 点）より，切粉を採取して行った．

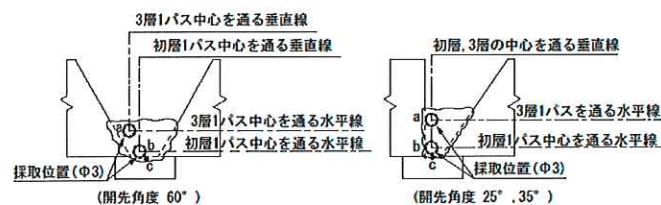


図4 溶接金属の試料採取位置(化学成分分析)と硬さ試験位置

それぞれの溶接試験体の溶接金属部分から、3 体の V ノッチ試験片（図 3(b)参照）を採取し、試験温度 0℃での吸収エネルギーと脆性破面率の計測を行った。幅 7.5mm のサブサイズの試験片で試験を行ったため、単位長さ当たりのエネルギー[J/cm]に換算した。

開先形状 60 度の溶接試験体から、それぞれ 3 本の試験片 (JIS Z3111, A2 号) を採取し、油圧試験機を用いて単調引張試験を行い、応力ひずみ関係を得た。溶接部の他に裏当て金材から JIS Z2241 14B 号試験片を加工し素材引張試験も行った。

ビッカース硬さ試験機を用い、溶接金属の断面位置を通る十字交差線上（初層 1 パス中心を通る垂直線，初層 1 パスを通る水平線，図 4 参照）に沿って測定を行った．試験荷重を 9.8N とし 0.5mm 間隔で行ったが，著しい変化が見られない範囲は，1mm 間隔とした．また，比較のために，裏当て金，母材の部分において，熱影響がほとんどないと思われる位置での硬さ基準値を計測した．

溶接金属部の窒素分析結果を表 4 に示す。また、裏当て金も含めた母材および溶接ワイヤの分析結果を表 1 中に示す。図 5 はこれらを比較してプロットしたもので、これより、窒素含有率の多い裏当て金を使用した試験体では窒素含有率が多いことが分かる。さらに、裏当て金に近い溶接金属ほどその値が大きい傾向が見られた。また、開先形状による大きな違いは見られないが、裏当て金母材の窒素含有量が多い場合に 60 度 V 開先が値が大きい傾向が見られた。60 度 V 開先が最も溶込みが大きいことも考慮すると、これらは主に裏当て金からの希釈が主要因と思われる。

試験体番号/ 試験片番号		N(%)	試験体番号/ 試験片番号		N(%)	試験体番号/ 試験片番号		N(%)	試験体番号/ 試験片番号		N(%)
①	a	0.0045	⑤	a	0.0051	⑨	a	0.0041	⑬	a	0.0041
	b	0.0057		b	0.0062		b	0.0041		b	0.0042
	c	0.0069		c	0.0096		c	0.0038		c	-
②	a	0.0048	⑥	a	0.0047	⑩	a	0.0044	⑭	a	0.0045
	b	0.0058		b	0.0063		b	0.0040		b	0.0041
	c	0.0065		c	0.0073		c	0.0039		c	-
③	a	0.0049	⑦	a	0.0052	⑪	a	0.0045	⑮	a	0.0047
	b	0.0055		b	0.0071		b	0.0042		b	0.0045
	c	0.0057		c	0.0074		c	0.0042		c	-
④	a	0.0047	⑧	a	0.0051	⑫	a	0.0043	⑯	a	0.0044
	b	0.0058		b	0.0067		b	0.0042		b	0.0046
	c	0.0071		c	0.0087		c	0.0038		c	-

※ a: 2-2 変形層(上直) b: ルート(直)直直 c: 第1パス(変当令内)

※ a: ピード表層側(上辺) b: ルート側(底辺) c: 第1パス(裏当金内)

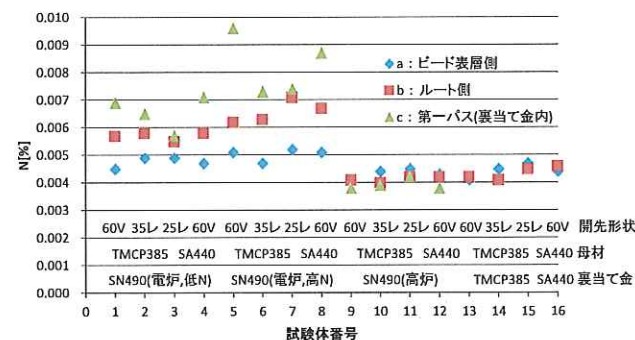


圖 5 窒素分析結果

TMCP385 と SA440 を母材とした完全溶込み溶接について、窒素含有量の異なる 3 種類の SN490 材と母材と同一材の合計 4 種類の裏当て金を使用して溶接試験体を製作し、化学成分分析と機械試験を行った。実験結果については次報で述べる。

*1 Graduate Student, Tokyo Denki University
*2 Assoc. Prof., Tokyo Denki University
*3 Tokyo Denki University
*4 Prof., WASEDA University
*5 YAMANE Steel Works Corporation
*6 Kakuto Corporation

完全溶込み溶接における裏当て金鋼材の影響

(その2) 実験結果および考察

正会員 ○見波 進^{*1}山下裕輔^{*2}同 中込忠男^{*3}同 山根正寛^{*4}同 西澤 淳^{*5}同 大森貴之^{*6}

完全溶込み溶接

裏当て金

ビッカース硬さ

高強度鋼

窒素量

シャルピー衝撃値

1. はじめに

前報では溶接試験体の作製および試験方法について説明し、化学成分分析結果を示した。本報では、引き続き実験結果について述べる。

2 実験結果

2.1 シャルピー衝撃試験

試験結果を表 1 に示す。それぞれ 3 体の試験体の平均値を採った値である。試験体番号の記号については前報を参照されたい。母材と裏当て金に同一材の鋼材を使用したものと、裏当て金に異なる鋼材を使用したものを比較すると、吸収エネルギーにやや変化が見られたが大きな差ではなかった。また、脆性破面率においては 30~75% の間で試験体ごとにばらつきが見られた。

表 1 シャルピー衝撃試験結果 (3 体の平均値)

試験体	番号	吸収エネルギー [J/cm]	破面率[%]
母材	裏当て金		
TMCP385 60V	SN電炉低N	①	137
	SN電炉高N	⑤	132
	SN高炉	⑨	140
	TMCP385	⑬	158
TMCP385 35L	SN電炉低N	②	135
	SN電炉高N	⑥	151
	SN高炉	⑩	146
	TMCP385	⑭	156
TMCP385 25L	SN電炉低N	③	149
	SN電炉高N	⑦	156
	SN高炉	⑪	140
	TMCP385	⑮	156
SA440 60V	SN電炉低N	④	145
	SN電炉高N	⑧	147
	SN高炉	⑫	141
	SA440	⑯	137

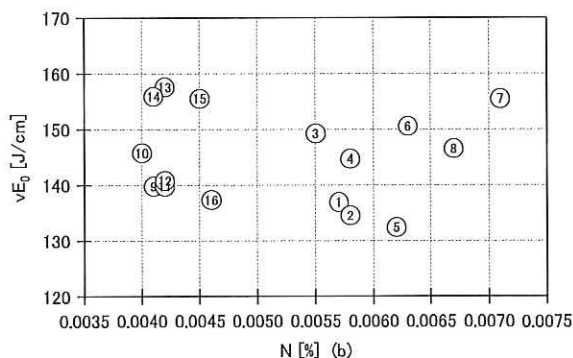


図 1. 吸収エネルギーと窒素含有量の関係

図 1 に吸収エネルギーと窒素含有量の関係を示す。プロット中の数字は試験体番号を示す。全体として大きな差はないが、下限値で見ると、ある程度の値までは窒素含有量が増加すると吸収エネルギーが低下する傾向が見られ、文献 1) と類似の傾向であった。

2.2 引張試験

試験結果一覧を表 2 に示す。それぞれ 3 体の試験体の平均を採った値である。図 2 はこれらを比較してプロットしたもので、裏当て金に強度の低い SN490 (電炉, 低N) が若干低いことが分かる。応力ひずみ関係の代表例を図 3 に示す。図中の破線は別途行った使用鋼材の素材引張試験結果の引張強さ σ_u である。母材に SA440、裏当て金に SN490 (電炉, 低N) を使用した時の引張強さがやや低いほか、裏当て金の明瞭な影響は見られなかった。

また、伸び、絞りについては、試験体ごとにばらつきがあるものの明瞭な差ではない。

表 2 引張試験結果 (3 体の平均値)

試験体	上降伏[N/mm ²]	下降伏[N/mm ²]	引張強さ[N/mm ²]	絞り[%]	伸び[%]
①	538.1	533.8	654.5	59.1	23.6
⑤	559.3	—	670.6	58.5	22.9
⑨	549.9	546.1	670.6	62.3	20.8
⑬	538.1	532.6	664.9	66.6	28.3
④	529.1	534.8	640.4	66.9	28.2
⑧	581.5	587.8	678.6	60.7	21.9
⑫	562.6	569.4	679.1	63.3	22.7
⑯	566.8	563.1	673.4	59.2	25.8

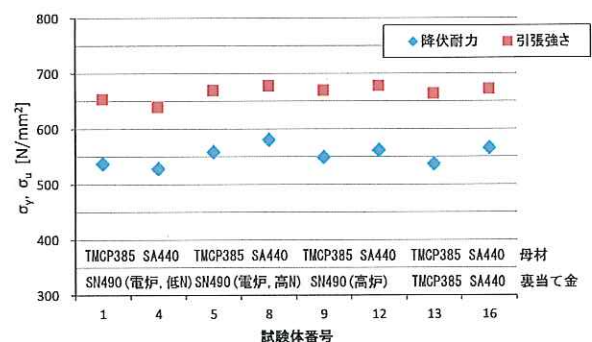


図 2 引張試験結果

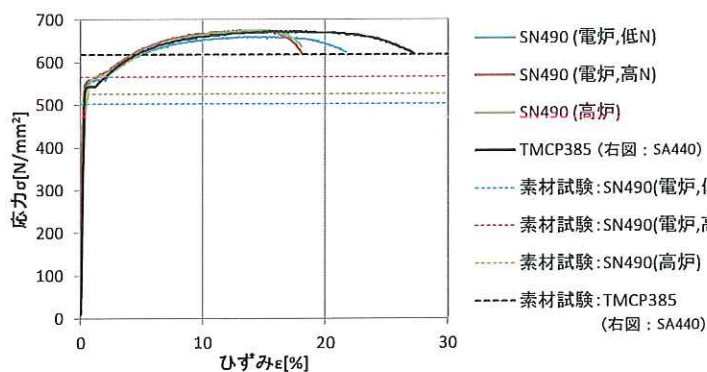
2.3 ビッカース硬さ試験

図 4 に試験結果の一例を示す。グラフの x, y は第一打点からの距離, HV はビッカース硬さを表している。また、それぞれ母材と裏当て金の硬さの基準値を実線で示す。

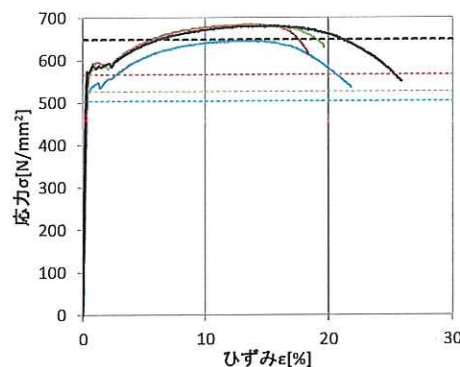
Influence of backing metal on weld metal in full penetration joints

Part 2: Experimental results

Susumu Minami, Yusuke Yamashita, Tadao Nakagomi, Masahiro Yamane, Jun Nishizawa, Takayuki Omori



(a) 母材に TMCP385 を使用した試験体



(b) 母材に SA440 を使用した試験体

図3 応力ひずみ関係と素材強度の比較

HV の変化は、おおよその試験体で溶接金属中のピッカース硬さが上昇し、HAZ 部でのピッカース硬さが溶接金属方向に減少する結果が見られた。裏当て金の影響があるとするれば、溶接金属部分で裏当て金の硬さに近づくと考えられるが、明瞭な関係は認められなかった。

図5に、式(1)で引張強さと降伏耐力の両方を評価し、

ピッカース硬さとの対応を表したものを示す。

$$\sigma_{flow} = (\sigma_y + \sigma_u) / 2 \quad (1)$$

同図中には素材の結果も示している。硬さと強度の関係には、ある程度の比例関係が見られた。

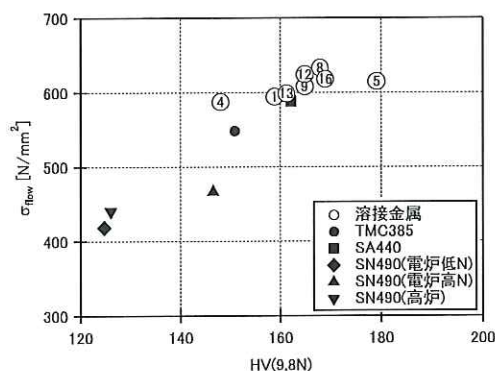
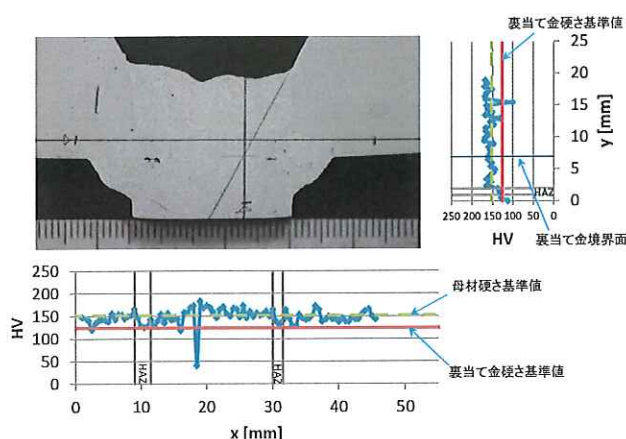
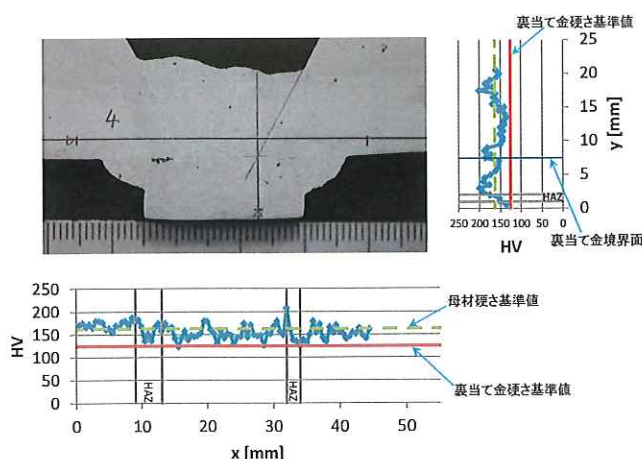


図5 硬さと σ_{flow} の関係



No.1 (TMCP385/SN490 電炉,低N)



No.4 (SA440/SN490 電炉,低N)

図4 硬さ試験結果の例

3. まとめ

完全溶込み溶接における溶接部の強度・靱性に及ぼす裏当て金鋼材の影響について各種試験を行った。

- ・裏当て金の窒素含有量が多い場合、溶接金属部の窒素含有量が増加し、また、表層より裏当て金に近い方が窒素量が多く含まれる。
- ・しかし、それに伴う溶接部の靱性や強度の影響や、裏当て金の材質の違いによる影響は小さい。
- ・本実験での鋼材の組合せの範囲において、裏当て金による溶接部の強度・靱性に及ぼす大きな影響は無いと思われる。

なお、本研究は(一社)日本溶接協会ロボット溶接研究委員会厚板向けの最適ロボット溶接施工技術開発プロジェクトの研究活動の一環として行われたものである。

【参考文献】

- 1) (一社)鉄骨建設業協会: 「裏当て金の材質が溶接部に及ぼす影響について」, 第5回鉄建協技術発表会資料, 2013年11月

*1 東京電機大学理工学部 准教授
 *2 東京電機大学理工学部
 *3 早稲田大学 教授
 *4 ヤマネ鉄工建設
 *5 (株)角藤
 *6 東京電機大学大学院理工学研究科修士課程 大学院生

*1 Assoc. Prof., Tokyo Denki University
 *2 Tokyo Denki University
 *3 Prof., WASEDA University
 *4 YAMANE Steel Works Corporation
 *5 Kakuto Corporation
 *6 Graduate Student, Tokyo Denki University

完全溶込み溶接における裏当て金鋼材の影響

(その3) DEPO 靱性の考察

正会員 ○板谷俊臣*¹ 同 見波 進*²
同 中込忠男*³ 同 的場 耕*⁴
同 笠原基弘*⁵

マグ溶接 裏当て金 SEM
希釈率 窒素量 シャルピー吸収エネルギー

1. はじめに

前報¹⁾では母材 TMCP385 と裏当て金に電炉高窒素材、電炉低窒素材、母材共材(TMCP385)を 590N/mm² クラスワイヤにて溶接施工して、化学成分分析と機械試験を実施した。その結果、裏当て金による溶接部の強度・靱性の及ぼす影響はなかった。本報告は、前報の中から最も一般的な 35° 開先試験体を取りあげ、裏当て金の DEPO 靱性に及ぼす支配要因と機構を考察した。

2 試験方法と試験結果

2.1 試験体と DEPO 靱性

表 1 に示す様に、裏当て金に電炉高窒素材と TMCP385 を用いた試験体の溶接部特性を比較試験した。表 2 に主な化学成分と全窒素、フリー窒素、窒化物量を示す。

表 1 試験体の組合せと DEPO 靱性

母材	試験体		吸収エネルギー (J/cm)
	裏当て金	試験体番号	
TMCP385	SN490B 電炉高窒素	⑥	151
	TMCP385	⑭	156

表 2 化学成分とガス分析結果(mass%)

	C	Si	Mn	P	S	T.N	F.N	Nitride
電炉高 N	0.15	0.24	1.45	0.026	0.011	0.0140	0.0132	0.0008
TMCP385	0.15	0.35	1.36	0.010	0.003	0.0030	0.0008	0.0022
溶接ワイヤ	0.05	0.84	1.96	0.010	0.010	0.0048	0.0002	0.0046
⑥ DEPO	0.09	0.51	1.38	0.011	0.010	0.0046	0.0033	0.0013
⑭ DEPO	0.10	0.50	1.39	0.010	0.009	0.0043	0.0031	0.0012

2.2 マクロ観察

図 1 にマクロ試験結果を示す。試験体⑥と⑭ともシャルピー試験片の V ノッチ底は一か所の再結晶部を含み他部は柱状晶であった。また、柱状晶と V ノッチの角度は約 40° であった。これより、DEPO 靱性を組織と化学成分と破面にて評価できることがわかる。

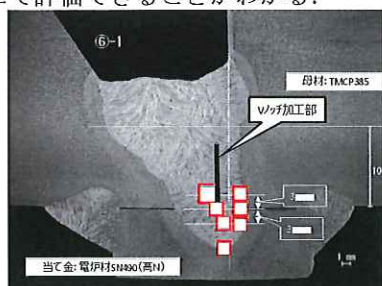


図 1 マクロ試験結果 (試験体番号⑥)

2.3 組織観察

V ノッチ底の組織 (図 1 ③部) を図 2 と図 3 に示す。

いずれの組織も粒界フェライト、粒内フェライト、ベイナイトであり、靱性を劣化させる粗大な粒界フェライトは観察されなかった。

図 4 より粒内フェライトの中心には $\phi 1\sim 5\mu\text{m}$ の Ti-Al-Si-Mn-O の複合酸化物が観察され、この酸化物が粒内フェライト起点となり DEPO 靱性を向上させている。

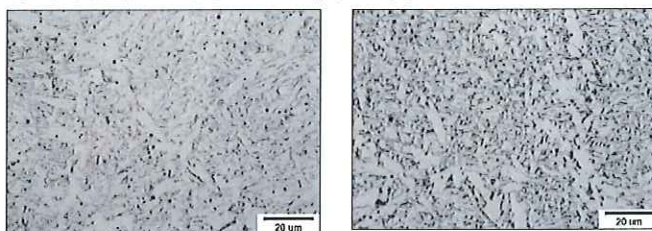


図 2 ⑥組織(裏当:電炉高窒素)

図 3 ⑭組織(裏当:TMCP385)

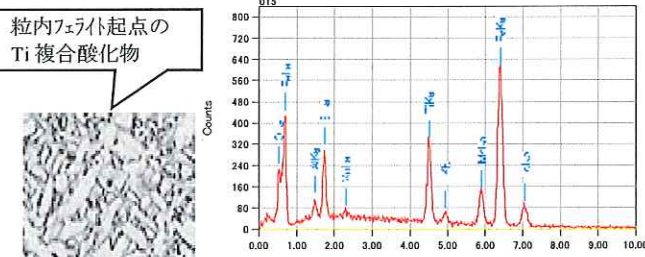


図 4 Ti-Al-Si-Mn-O 複合酸化物の EDS 分析結果

2.4 破面観察

シャルピー試験片の破面を図 5 と図 6 に、破壊中間部の SEM 観察結果を図 7 と図 8 に示す。前報では図 5、図 6 に示す破断中央部を目視で脆性破面と判断したが、SEM 観察の結果 100% 延性破面であった。このことは裏当て金に電炉高窒素でも TMCP385 でも DEPO 近辺を割れが伝搬する場合は、延性破壊であり充分な変形が許容される。ディンプル底には Ti 複合酸化物が観察されたが、このサイズであれば脆性破壊には至らなかった。

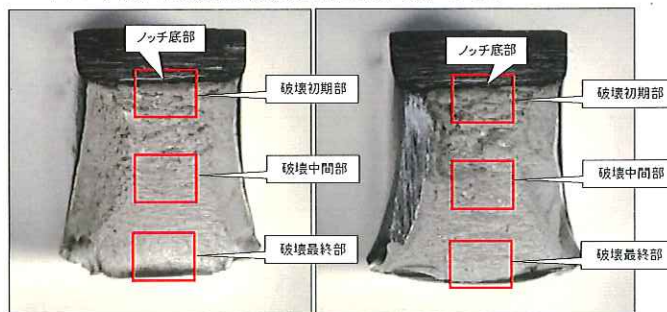


図 5 破面(裏当:電炉高窒素)

図 6 破面(裏当:TMCP385)

Influence of backing metal on weld metal in full penetration joints

Part 3: Consideration about the DEPO fracture toughness

Toshiomi Itatani, Susumu Minami, Tadao Nakagomi, Ko Matoba and Motohiro Kasahara

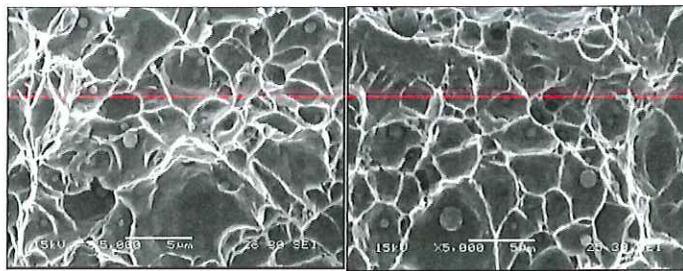


図7 破面 SEM(裏当:電炉高窒素) 図8 破面 SEM(裏当:TMCP385)

2.5 溶接部の寄与率

表3にDEPOの裏当て金、母材、ワイヤの寄与率を示す。算出方法は、断面マクロ画像よりパスに占める各部の面積から寄与率を求め、トレーサ元素としてCu, Moを使い、裏当て金、母材、ワイヤ、DEPOの化学成分結果より検証した。これより1パス目では裏当て金が34%(試験体⑥)、30%(試験体⑭)溶融していたが、2パス目ではワイヤによる希釈が進展していることがわかる。

表3 溶接部の寄与率

		裏当て金	母材	ワイヤ
試験体⑥	1パス	34%	17%	49%
裏当:電炉高窒素	2パス	9%	18%	73%
試験体⑭	1パス	30%	14%	56%
裏当:TMCP385	2パス	8%	20%	72%

2.6 スラグへの移行率

図9にスラグ移行率を示す。算出方法は、前述した寄与率と各部の化学成分の分析結果より、本来DEPOに固溶していると想定する成分がわかる。この成分とDEPO分析値との差が、浮上分離してスラグへ移行した量としてスラグ移行率を算出した。

これより、酸素との親和力の強いTiは溶接中に60%(試験体⑥)、65%(試験体⑭)が酸素と結合して良導体であるTi酸化物となり、アークの安定に寄与する。一方DEPO中のTiは窒化物、酸化物を形成して機械的性質に寄与する。

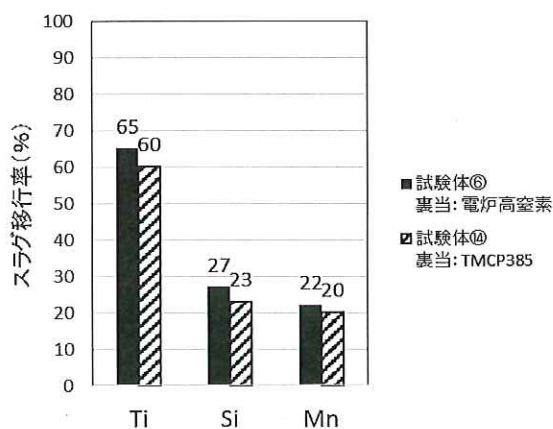


図9 スラグ移行率

2.7 窒素のマスバランス

図10に前述した寄与率と各部の全窒素、窒化物量、フリー窒素分析結果より算出した裏当て金～DEPO2パスの各窒化物量を示す。

電炉高窒素材の全窒素は0.0140%でありフリー窒素は0.0132%であった。溶接ワイヤの全窒素は0.0048%でありフリー窒素は0.0002%であった。

図10より、裏当て金にフリー窒素が多い電炉高窒素材を使用した場合、溶接によりフリー窒素が少ないワイヤで希釈していることがわかる。その結果、1パスDEPOのフリー窒素は0.0047%となり溶接部靱性が急激に劣化すると報告³⁾されている0.0090%より低下する。

本試験では溶接による窒素のピックアップは認められなかったが、溶接条件やシールドの管理は肝要である。

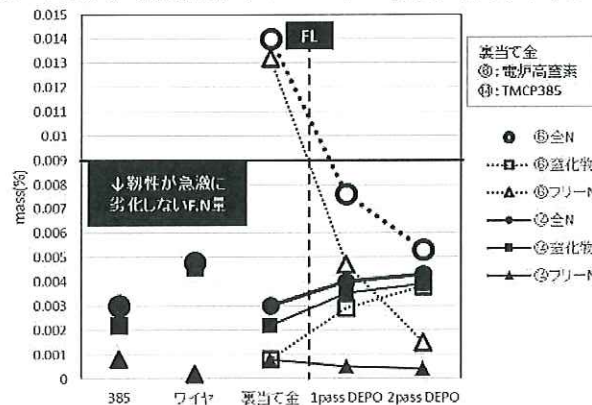


図10 各窒素の推移(DEPOは寄与率からの計算値)

3. まとめ

裏当て金に電炉高窒素材とTMCP385を使用した試験体を比較試験することで、溶接部の特性に及ぼす裏当て金鋼材の影響について考察した。

- ・フリー窒素が多い電炉高窒素材はワイヤにて希釈され、靱性を劣化させないフリー窒素量まで低下した。
- ・いずれも溶接部組織はTi複合酸化物を起点とする粒内フェライトと粒界フェライトとベイナイトであり、衝撃試験の破面が100%延性破面であることから、裏当て金の材質は溶接部特性の劣化に影響を及ぼさない。

【謝辞】本研究は日本溶接協会ロボット溶接研究委員会厚板向けの最適ロボット溶接施工技術開発プロジェクトの研究活動の一環として行われたものである。また、日本溶接技術センター大北茂氏、神戸製鋼 鈴木励一氏には多大なご助言を頂き、ここに謝意を表する。

【参考文献】

- 1) 見波進ら：完全溶込み溶接における裏当て金鋼材の影響 (その1～2), 建築学会大会講演梗概集, A-1, pp.1005-1008 (2014.9)
- 2) 山田知典ら：鋼溶接金属におけるアジューフェライト生成に関与する介在物の微視的観察, 溶接学会論文集, 25-3, pp.416-420 (2007.8)
- 3) 十川泰雄ら：80キロ鋼ボンド部の靱性におよぼすNの影響, 溶接学会全国大会講演梗概, 15, pp.94-95 (1974.10)

*1 榎永井製作所 博士(工学)
 *2 東京電機大学理工学部 准教授 博士(工学)
 *3 信州大学 名誉教授 博士(工学)
 *4 榎角藤 博士(工学)
 *5 (有)アクトエーションハート 博士(工学)

*1 Nagai Steel Works Corporation, Dr.Eng.
 *2 Assoc. Prof., Tokyo Denki University, Dr.Eng.
 *3 Prof. emeritus, Shinshu University, Dr.Eng.
 *4 Kakuto Corporation, Dr.Eng.
 *5 Action-Creation-Heart Corporation, Dr.Eng.