

## 建築用厚鋼板の溶融亜鉛めっき後の特性に関する研究

## —その1 実験概要—

厚鋼板  
熱加工制御溶融亜鉛めっき  
熱処理機械的性質  
高強度鋼正会員 ○的場 耕<sup>\*1</sup> 正会員 廣田 実<sup>\*2</sup>  
同 藤沢 清二<sup>\*2</sup> 同 山下 達雄<sup>\*1</sup>  
会員外 石田 常夫<sup>\*1</sup>

## 1. はじめに

建築鉄骨の耐食性を長期に確保することを目的に、防錆処理に溶融亜鉛めっき（以降、めっきと称す）を採用する工事が多数存在している。この溶融亜鉛めっき鉄骨製品に使用する鋼材は、400N/mm<sup>2</sup>級・490N/mm<sup>2</sup>級鋼のS・S・SM・SN材が主であり、これらの鋼材がほぼ良好なめっき性を確保していたことも長年の実績から明らかである。ただし、溶融亜鉛脆化割れが鉄骨製品の三面隅角部や曲げ材に発生する恐れがある未解決な問題点も残ったままとなっている。

一方、最近の建築鉄骨の分野においては、降伏点 325N/mm<sup>2</sup>級・355N/mm<sup>2</sup>級・385N/mm<sup>2</sup>級・440N/mm<sup>2</sup>級鋼などの熱加工制御（圧延・圧延＋水冷）、焼入れ焼戻しの処理を施した鋼材が主要な部材に使用される傾向が強まっており、これらの高強度鋼を使用した製品をめっき施工することも一部に生じている。

しかし、これらの高強度鋼をめっきした場合のめっき性、具体的には機械的性質の変化、耐溶融亜鉛脆化割れ、亜鉛の付着量、亜鉛表面の外観に及ぼす影響について、実験データはほとんど存在せず、不明瞭な点が多い。

そこで、本実験ではめっき鉄骨製品の構造安全性を証明することを目的に、現在建築鉄骨に使用されている高強度鋼をめっき施工し、そのめっき性を試験によって明らかにし、証明するための実験データを取得した。その結果を報告する。

## 2. 実験概要

## 2.1 供試材料

供試材料は従来から問題無いとされる通常圧延材を基本に、TMCP鋼と調質鋼を3種類、計4種類の鋼材（銘

柄）とした。なお、めっき施工をする場合、鋼材を約450℃の溶融亜鉛に浸漬するが、この温度は制御圧延や熱処理の温度に比べて低い温度である。

板厚について、構造物で割れは厚板に溶接される薄板側に発生するが、高強度鋼を使用する構造上の必要性から、高強度鋼は厚板側に使用されるため、板厚は40mmを基本に一鋼種のみ60mmを追加し実験を行った。供試材料の一覧を表1に、化学成分と機械的性質（ミルシート値）を表2に示す。

## 2.2 実験方法

めっき性の確認実験は、めっき前後の機械的性質の変化（引張・衝撃）、断面ミクロ組織、耐溶融亜鉛脆化割れ性、亜鉛付着量、表面外観の評価について行う。引張・衝撃試験については、めっき前の鋼板とめっき施工した鋼板より採取した試験片で機械試験を実施し、めっき前後の変化を確認する。なお、めっき施工は500×600に切断した鋼板で実施した。試験項目一覧を表3に、試験片採取位置を図1、2に示す。

引張試験はL方向（圧延方向）、C方向（圧延と直交方向）、Z方向（板厚方向）について各2本実施し、試験結果の平均値で評価する。衝撃試験は試験温度0℃とし、L

表1 供試材料一覧

分類	耐力 N/mm <sup>2</sup>	記号 (銘柄)	製造履歴	板厚 mm
基本	325	SN490C	通常圧延材（アスロール）	40
対比	355	SM520B-SNC	制御圧延材（TMCP鋼）	40
	385	HBL385C	制御圧延＋制御冷却 （TMCP鋼）	40 60
	440	SA440C	焼入れ焼戻し材（調質鋼）	40

表2 供試鋼材の化学成分および機械的性質（ミルシート値）

記号 (銘柄)	t mm	C	Si	Mn	P	S	Nb	Ni	Mo	V	Cr	Cu	Ti	B	Ceq	CEZ	Y.P. N/mm <sup>2</sup>	T.S. N/mm <sup>2</sup>	E.L %	Y.R. %	vEo J
		×10 <sup>2</sup>			×10 <sup>3</sup>		×10 <sup>2</sup>								×10 <sup>4</sup>	×10 <sup>2</sup>					
SN490C	40	16 15	27 28	143	9 10	2	1	2 0	1	0	3	— 1	— 0	— 1	42 41	— 41	395	529	31	75	304
SM520B-SNC	40	17	39 38	143 141	14 16	3	2	1 0	1	0	3	2 —	— 1	0 1	43 45	— 45	375	540	32	69	192
HBL385C	40	14	32 33	129	14 15	2	1	2 0	1	0	4	2 —	— 1	0 1	38 40	— 40	467	595	51	78	296
HBL385C	60	15	34	126 127	14 15	2	1	2 1	1	0	4	1 2	— 1	0 1	38 40	— 40	436	586	31	74	221
SA440C	40	8	2	153 155	3 4	2	1	2 1	30 28	4 5	2	— 2	— 1	— 1	42 47	— 47	505	646	51	78	312

化学成分：上段はミルシート値、下段はチェック分析結果（上段と同じ場合、下段を省略している）

CEZ = C + Si/17 + Mn/7.5 + Cu/13 + Ni/17 + Cr/4.5 + Mo/3 + V/1.5 + Nb/2 + Ti/4.5 + B×420

A study on properties due to hot-dip galvanizing of structural steel plates

— (Part 1) Outline of experiment

MATOKA Ko, HIROTA Minoru, HUIJISAWA Seiji, YAMASHITA Tatsuya, ISHIDA Tokio,



表 3 試験項目一覧

試験体	試験項目		
鋼板	引張試験	L方向	めっき前, めっき後
		C方向	
		Z方向	
	衝撃試験	L方向	
		C方向	
	断面ミクロ組織		
	膜厚測定		
外観目視			
角形鋼管 溶接継手	磁粉探傷試験	全周	めっき部, 不めっき部
	断面マクロ	角部	
		平坦部	
	膜厚測定		めっき後
	外観目視		

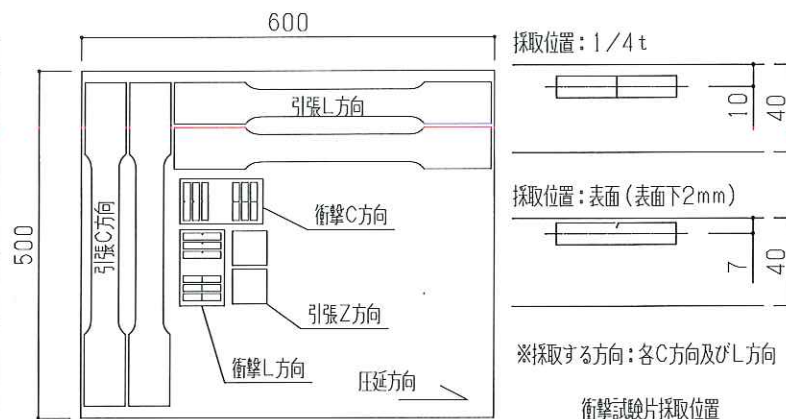


図1 機械試験片採取位置(鋼板)

表 4 めっき施工条件

	処理 (濃度)	浴槽温度	処理時間
1	脱脂 (6%)	70~75℃	15~30分
2	酸洗 (塩酸 8~9%)	10~15℃	90~120分
3	溶融亜鉛浸漬	鋼板 440℃±1℃	5分
		角形鋼管 440℃±1℃	10分
4	冷却	10~15℃	30秒

※溶融亜鉛浸漬：浸漬に要する時間≒1分、引上に要する時間≒2分

方向、C方向のノッチ位置を変化させた計4種類について各3本実施し、試験結果の平均値で評価する。断面ミクロ組織は100倍、400倍で割れ、組織を観察する。亜鉛付着量は膜厚計により5点測定した膜厚の平均値から換算し求めた。

溶接された鋼板に発生する割れの有無を確認するために、通しダイアフラムと角形鋼管の溶接継手試験体を製作し、割れの有無を外観目視・磁粉探傷・断面マクロ観察で確認する。鋼材の違いの他に、不めっき処理を施すことで亜鉛の接触の有無が割れ発生に及ぼす影響も合わせて確認した。断面マクロ試験片を角形鋼管の角部と平坦部より、めっき部、不めっき部それぞれ各試験体より採取し、割れの有無を確認した。なお、溶接部の割れ発生確認実験を通しダイアフラムと角形鋼管の溶接継手としたのは、高強度鋼を薄板として採用しないことを前提としている。

### 3. めっき浸漬施工

めっき施工は標準的な条件で前処理および亜鉛浴浸漬を実施した。施工の工程と処理時間を表4に示す。めっき施工状況およびめっき施工後の外観を写真1,2に示す。なお、めっき施工はガルバテックス（行徳工場）において実施した。

### 4. まとめ

その1では研究の目的、実験概要、めっき施工について報告した。その2で試験結果について報告する。

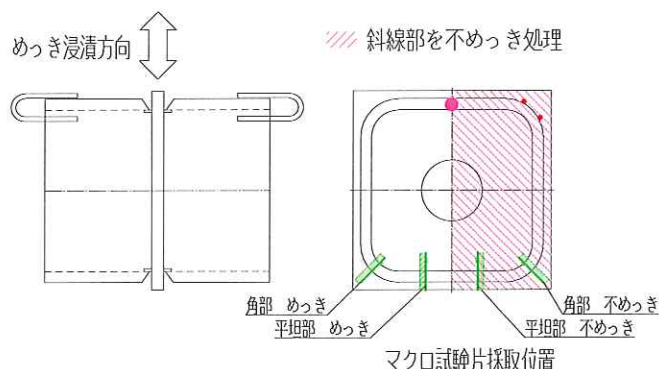


図2 溶接継手試験体形状(マクロ試験片採取位置)

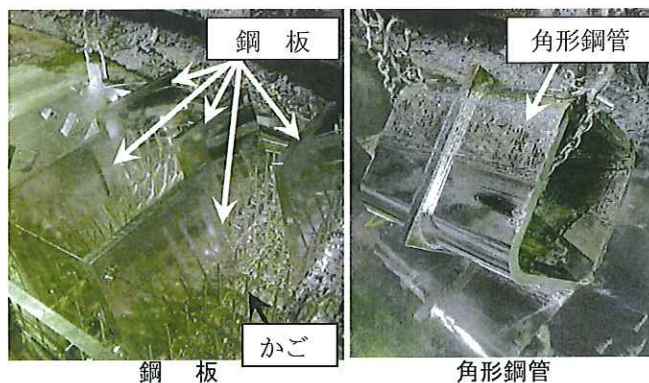


写真1 めっき施工状況

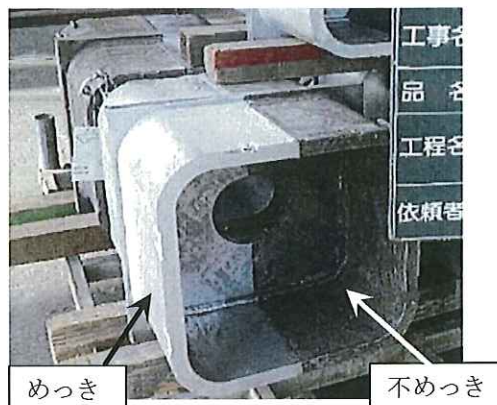


写真2 めっき後写真(角形鋼管)

\*1 角藤, \*2 J F E スチール

\*1 Kakuto co., \*2 JFE Steel.



## 建築用厚鋼板の溶融亜鉛めっき後の特性に関する研究

## —その2 実験結果 外観・組織観察—

厚鋼板	溶融亜鉛めっき	機械的性質
熱加工制御	熱処理	高強度鋼

正会員	○藤沢 清二 <sup>*1</sup>	正会員	廣田 実 <sup>*1</sup>
同	山下 達雄 <sup>*2</sup>	会員外	石田 常夫 <sup>*2</sup>
同	的場 耕 <sup>*2</sup>		

## 1. はじめに

前報では、建築用厚鋼板（降伏点 325 N/mm<sup>2</sup>級・355 N/mm<sup>2</sup>級・385 N/mm<sup>2</sup>級・440 N/mm<sup>2</sup>級鋼）の溶融亜鉛めっき施工前後における各種試験計画と、溶融亜鉛めっき施工について報告した。本報では引き続き、めっき前後の鋼材性能比較、形成されためっき層について報告する。

## 2. めっき層調査結果

## 2. 1 鋼板のめっき層

前報の方法により溶融亜鉛めっき施工した、各種鋼材のめっき層の状況を観察した。鋼板ままで亜鉛めっきしたものは、目視確認の結果、表面性状は美麗であり、Si 量起因などによるめっき焼け現象は確認できなかった。各鋼板の表面状態について、図 1 にめっき前後のミクロ組織観察結果を示す。ミクロ観察を実施した鋼材は降伏点 325 N/mm<sup>2</sup>級・355 N/mm<sup>2</sup>級・385 N/mm<sup>2</sup>級・440 N/mm<sup>2</sup>級鋼の 4 種であるが、いずれも図 2 の標準的なめっき層構成同様の良好なめっき組織が得られている。めっき皮膜厚さを表 1 に示す。総合評価として最低限求められる指標であるめっき付着量（めっき皮膜厚さより換算） $\geq 550 \text{ g/m}^2$ を満足している。各鋼材について、皮膜厚さ結果について考察する。一般に皮膜厚さは、鋼材の Si 量に影響を受けることが知られている<sup>\*)</sup>。めっき浴温度にも影響を受けるが、皮膜厚さが薄くなる比較的低い温度（450℃程度）においても Si 量により付着量下限を下回ることがないが、大凡図 3 のような関係となる。改めて、前報で示された化学成分分析結果の Si 量に着目すると、降伏点 325 N/mm<sup>2</sup>級・355 N/mm<sup>2</sup>級・385 N/mm<sup>2</sup>級鋼は、Si 量が 0.27%~0.39% となっており、図 3 の図と比較し妥当な付着量であると推察する。440 N/mm<sup>2</sup>級鋼は Si 量が 0.02% と他鋼材よりも低く、付着量が少なくなる領域であるため妥当と考える。385 N/mm<sup>2</sup>級鋼の厚さ 40mm と 60mm は Si 量は同等であるが、付着量に差が出た。めっき浸漬は同時施工であるため、厚さによる鋼材熱容量差が表面温度変化速度差を生じさせ、低温よりとなった厚さの大きい 60mm 付着量が減った可能性がある。

## 2. 2 通しダイアフラム形式角形鋼管短柱のめっき層

前節では鋼板ままで溶融亜鉛めっき施工した際の、めっき層状況について纏めた。これら鋼板全てに、鋼材規格；BCP325、断面サイズ；□-600×600×36mm（製造；(株)セイケイ）の角形鋼管を溶接した試験体のめっき施工

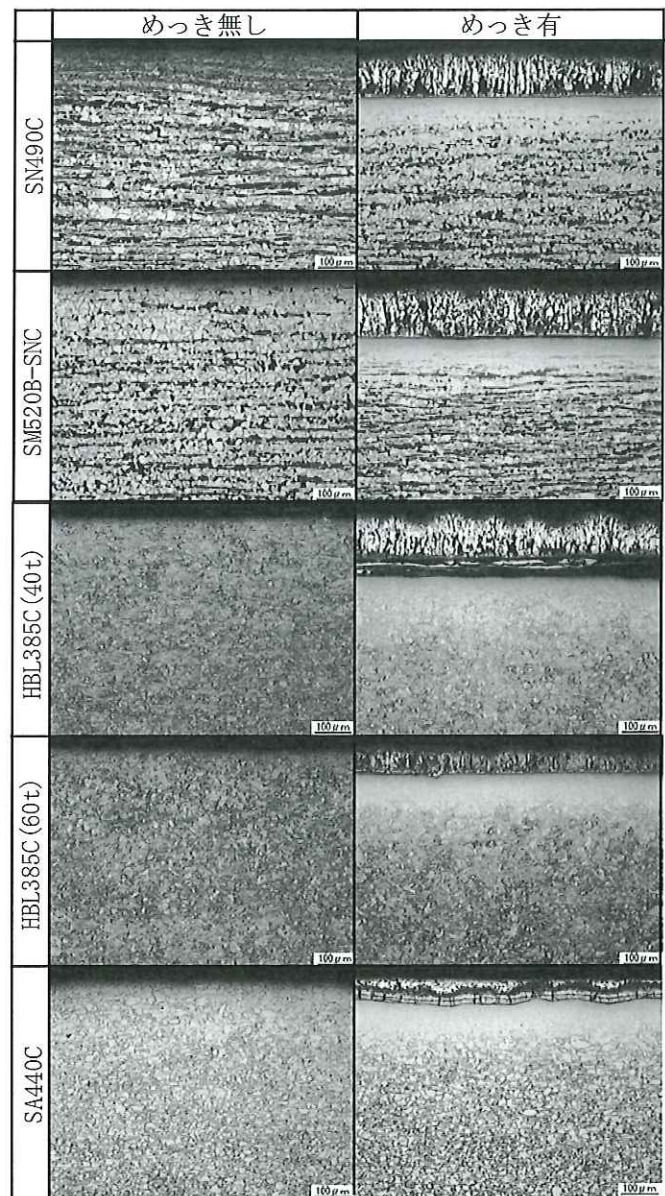


図1 めっき前後 ミクロ組織観察結果 (×100)

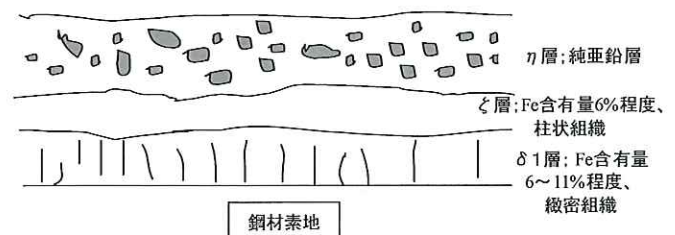


図2 標準的なめっき層構成

A study on properties due to hot-dip galvanizing of structural steel plates

- (Part2) Microstructural observation

FUJISAWA Seiji, HIROTA Minoru, YAMASHITA Tatsuya, ISHIDA Tokio, MATOBA Ko



後の溶接部マクロを図 4 に示す。まず、ダイアフラムの表面状況は鋼板ままのめっき状況と同様である。マクロ観察はそれぞれ鋼種のダイアフラムに対して、角形鋼管平坦部とコーナー部について行った。結果、いずれも顕著な疵、割れは見受けられない。

### 3. 通しダイアフラム形式角形鋼管短柱の磁粉探傷

表層近傍の疵、割れ有無の確認のために、JIS G0565 に準拠した磁粉探傷試験を実施した。探傷の範囲は拘束が大きいと考えられるコーナー溶接部とした。探傷条件を表 2 に示す。磁粉探傷の結果、疵、割れは検出せず、健全な状態であることを確認した。

### 4. まとめ

その 2 では亜鉛めっきの状況について観察、また、膜厚確認、磁粉探傷結果を報告した。今回試験に供した鋼材と試験体ディテール（部材長さ、厚さなど）では、健全なめっき層が得られ、割れも生じなかった。但し、今回の試験体のボリュームは実際の部材よりも小さく、拘束も少ない条件であり、安全側の評価試験をしているとは言えないが、拘束を減らし、浸漬方法などを確立することで、高強度鋼材のめっきによる割れや、健全な塗膜形成の可能性を示唆したものとする。続いて、その 3 では機械的性質について報告する。

（参考文献）1.溶融亜鉛めっきの設計・製作上の留意点；亜鉛めっき鋼構造物研究会、2.溶融亜鉛めっき上の塗装 最新技術と一般注意事項について；（社）日本溶融亜鉛鍍金協会、3.一解説一溶融亜鉛めっき大型鋼構造物のめっき割れ現象とその防止法；（株）巴コーポレーション、巴技研

表 1 めっき皮膜厚さ

耐力 N/mm <sup>2</sup>	記号 (銘柄)	製造履歴	板厚 mm	平均膜厚*1 μm	めっき付着量*2 g/m <sup>2</sup>
325	SN490C	通常圧延材 (JFE スチール)	40	149	1070
355	SM520B-SNC	制御圧延材 (TMCP 鋼)	40	149	1071
385	HBL385C	制御圧延+制御冷却 (TMCP 鋼)	40	142	1022
			60	101	729
440	SA440C	焼入れ焼戻し材 (調質鋼)	40	81.8	589

\*1 膜厚測定は鋼板内任意の点を 5 点計測。平均値を記載。

\*2 平均膜厚より重量換算

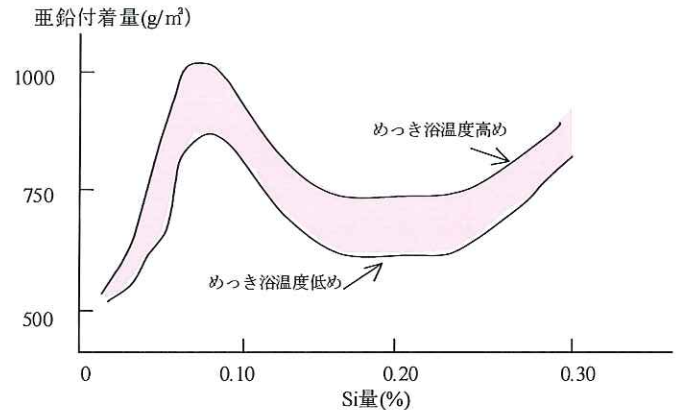


図 3 亜鉛付着量と鋼材 Si 量の関係

表 2 磁粉探傷条件

検査方法	極間法による湿式連続法	
検査機器	磁化装置	栄進化学 A-2型
	紫外線照射装置	マクテック D-10
探傷条件	磁化電流	AC4300 Amp. Turn
	通電時間	5秒 × 2方向
	磁粉	栄進化学 SY-7500
	磁極間距離	100mm
	表面状態	グラインダー研磨後

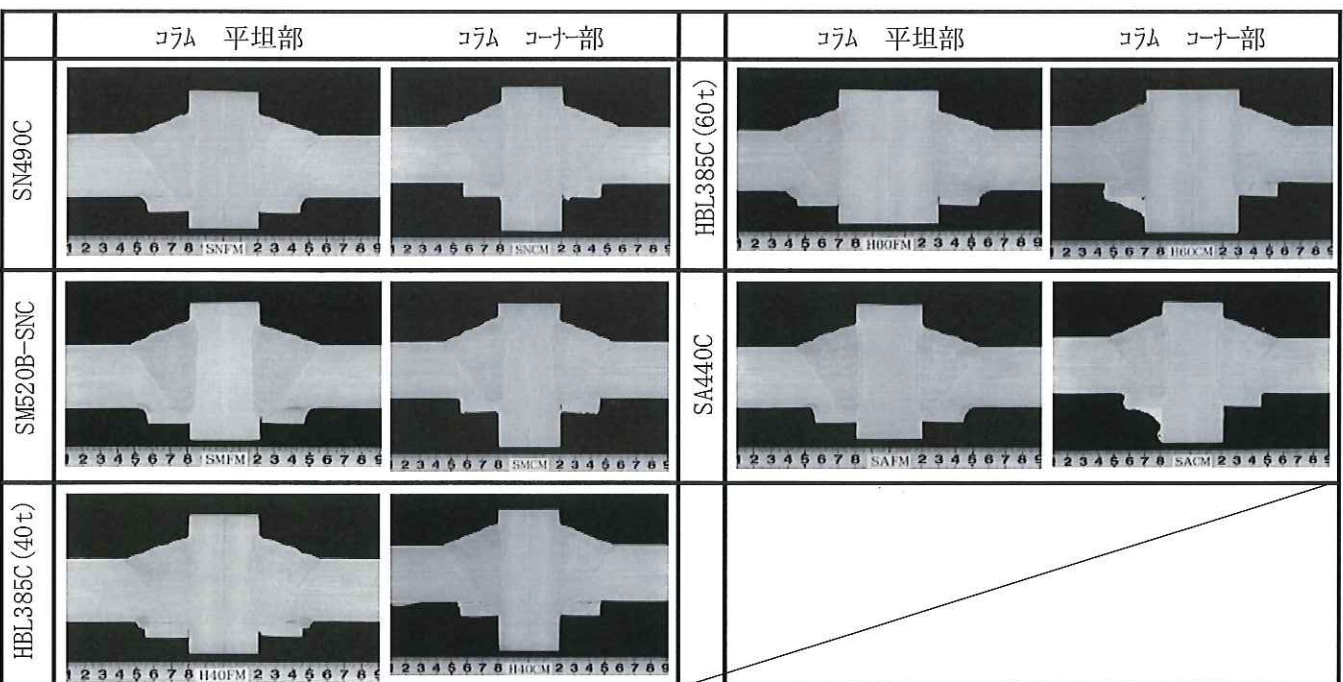


図 4 亜鉛めっき施工後の溶接部マクロ

\*1 JFE スチール, \*2 角藤

\*1 JFE STEEL co., \*2 Kakuto co.

## 建築用厚鋼板の溶融亜鉛めっき後の特性に関する研究

## —その3 実験結果 機械的性質—

厚鋼板  
熱加工制御溶融亜鉛めっき  
熱処理機械的性質  
高強度鋼正会員 ○廣田 実<sup>\*1</sup>  
同 山下 達雄<sup>\*2</sup>  
同 的場 耕<sup>\*2</sup>正会員 藤沢 清二<sup>\*1</sup>  
会員外 石田 常夫<sup>\*2</sup>

## 1. はじめに

前報では、建築用厚鋼板（降伏点 325N/mm<sup>2</sup>級・355N/mm<sup>2</sup>級・385N/mm<sup>2</sup>級・440N/mm<sup>2</sup>級鋼）および、当該材をダイアフラムとした、溶接試験体のめっき状況を報告した。本報ではめっき前後の鋼材の機械的性質について報告する。

## 2. 引張試験結果

引張試験結果を表1、表2に示す。引張試験は、相対的な評価ができるように全て全厚試験片（1A号,5号）により実施した。L方向（圧延方向）、C方向（圧延直交方向）でそれぞれめっき前後で2本毎で実施した（試験片採取要領は前々報図1を参照）。Z方向（板厚方向）は絞りRA（%）のみ計測した。めっき前後のYS、TSを図1に纏める。標本数は少ないが、全体にめっき後YSは低めに、TSは高めに变化する傾向がみえる。但し、いずれの鋼種においても、めっき前後の性能差は小さく、最大差はSM520B-SNCのC方向YSの20N/mm<sup>2</sup>である。TSの最大差はHBL385Cの60mm、C方向で11N/mm<sup>2</sup>である。次に、EL差を図2に、YR差を図3に纏める。ELはめっきによる変化は最大3%程度であり全体にELは増加傾向である。YRは最大3%台の変化で、めっき前よりも低YR化する傾向であった。Z方向絞りRAを図4に示す。いずれもRAが低下することはなかった。

めっきによる引張性能を著しく低下させるような現象は認められなかった。

表2 めっき前後 引張試験結果（Z方向）

鋼種	SN490C	SM520B-SNC	HBL385C(40)	HBL385C(60)	SA440C
RA(%)					
JIS G 3199					
タイプb					
めっき前	75	71	72	75	64
めっき後	73	71	75	67	69
前後差平均値（後-前）	+2	-3	+2	+4	+11

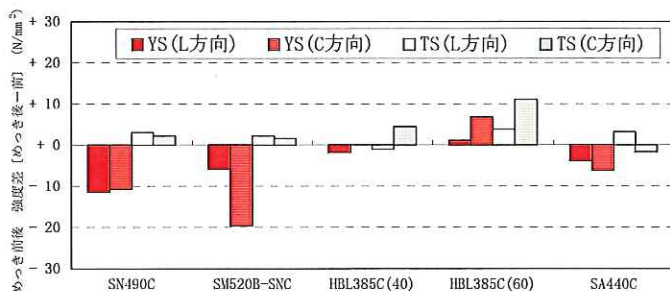
図1 めっき前後 YS・TS (N/mm<sup>2</sup>) 比較

表1 めっき前後 引張試験結果（L, C方向）

鋼種	試験片 採取方向	試験片 形状	めつき 前後	YS	TS	EL	YR
				N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%	%
SN490C	L	JIS Z 2201 1A号	前	397	518	35	77
				396	518	34	76
		後	382	521	32	73	
			388	522	33	74	
	前後差平均値（後－前）			－ 11	＋ 3	－ 2	－ 3
	C	JIS Z 2201 1A号	前	398	521	32	76
				404	521	33	78
		後	390	524	32	74	
392			523	32	75		
前後差平均値（後－前）			－ 11	＋ 2	－ 1	－ 2	
SM520B －SNC	L	JIS Z 2201 1A号	前	359	532	31	68
				372	532	33	70
		後	357	534	34	67	
			362	534	31	68	
	前後差平均値（後－前）			－ 6	＋ 2	＋ 1	－ 1
	C	JIS Z 2201 1A号	前	371	532	29	70
				384	532	30	72
		後	356	534	32	67	
360			533	31	67		
前後差平均値（後－前）			－ 20	＋ 2	＋ 2	－ 4	
HBL385C (t40)	L	JIS Z 2201 5号	前	456	591	53	77
				452	591	52	77
		後	453	589	55	77	
			451	590	56	76	
	前後差平均値（後－前）			－ 2	－ 1	＋ 3	－ 0
	C	JIS Z 2201 5号	前	454	586	53	77
				450	585	53	77
		後	451	590	56	76	
452			589	56	77		
前後差平均値（後－前）			＋ 0	＋ 4	＋ 3	－ 1	
HBL385C (t60)	L	JIS Z 2201 5号	前	407	595	56	68
				410	595	55	69
		後	410	600	56	68	
			409	599	57	68	
	前後差平均値（後－前）			＋ 1	＋ 4	＋ 1	－ 0
	C	JIS Z 2201 5号	前	406	590	54	69
				408	590	54	69
		後	414	601	57	69	
413			601	56	69		
前後差平均値（後－前）			＋ 7	＋ 11	＋ 3	－ 0	
SA440C	L	JIS Z 2201 5号	前	494	632	54	78
				485	629	54	77
		後	482	632	56	76	
			489	635	56	77	
	前後差平均値（後－前）			－ 4	＋ 3	＋ 2	－ 1
	C	JIS Z 2201 5号	前	495	636	53	78
				493	638	53	77
		後	486	635	54	76	
489			635	54	77		
前後差平均値（後－前）			－ 6	－ 2	＋ 1	－ 1	

A study on properties due to hot-dip galbanizing of structural steel plates

-(Part3) Mechanical properties of steel plates

HIROTA Minoru, FUJISAWA Seiji, YAMASHITA Tatsuya, ISHIDA Tokio, MATOBA Ko



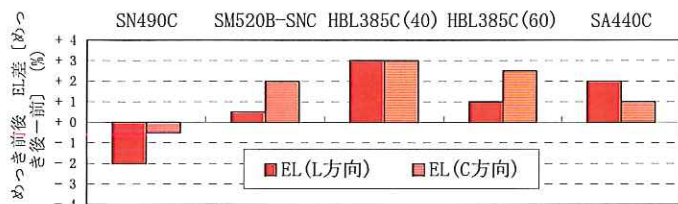


図2 めっき前後 破断伸び EL (%)

### 3. シャルピー衝撃試験

シャルピー衝撃試験結果を表3に示す。シャルピー衝撃試験は、通常鋼材の性能保証位置となる厚さ 1/4t の位置の L 方向に、C 方向を追加した。また、可能な限りめっき層近傍とした表層から試験片中央が 7mm の位置でノッチ位置も試験片表面としたもので行った（前々報図1を参照）。

まず、各試験値の個々値は同じパラメータであれば、特異値はなく安定している。めっき前後でのシャルピー吸収エネルギー  $vE_0$  (J) 絶対値差は、SN490C-L 方向-断面ノッチでめっき後に 44J 増加したものが最大であり、SN490C-L 方向-表面ノッチ、SA440C-C 方向-断面ノッチが 0J で差なしが、最小であった。脆性破面率も計測しているが、めっき前後での差は、全体に少ない。更に検討のため、図5にめっき前後での  $vE_0$  変化率を示す。全体に鋼種や試験片採取要領に関わらず、めっき後は低下傾向にある。これは前報で示した、めっき層近傍の鋼材組織の増加などが確認されることなどが原因と思われる。低下レベルとしては、最大 10%程度と実用上は問題ないと考えられる。

### 4. まとめ

その3では亜鉛めっき前後の機械的性質について報告した。引張性能、衝撃性能について著しい性能低下などは認められず、各種規格規定値を満足するものであった。今回の一連の報告は、鋼材成分や組織の一事例であるが、傾向を捉えるに足りるものとする。今後、データの拡充が期待される。また、めっき割れについては部材ボリュームや拘束度を左右するディテール、構成する板厚差などに甚大な影響を受けるため、更に多角的視点からの検討が必要である。

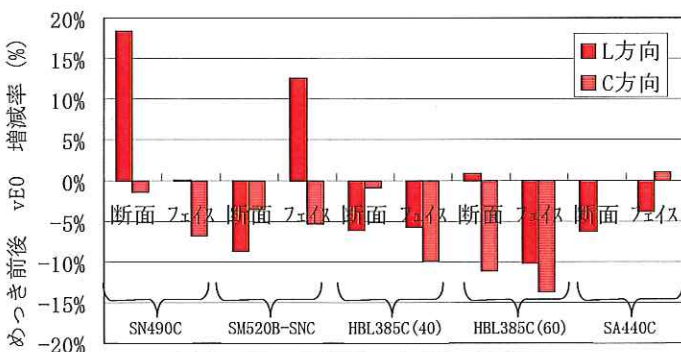


図5 めっき前後 シャルピー-衝撃値

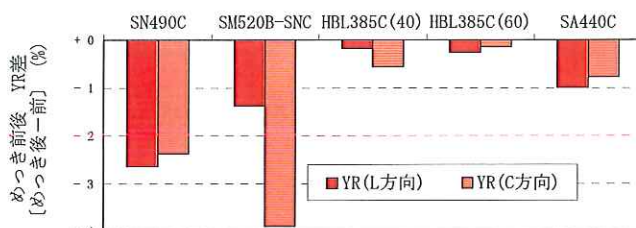


図3 めっき前後 降伏比 YR (%)

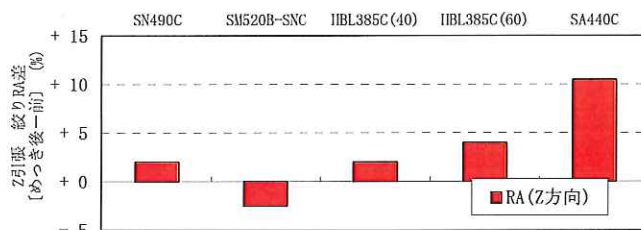


図4 めっき前後 Z方向絞り RA (%)

表3 めっき前後 シャルピー衝撃試験結果

鋼種	Vノッチ	試験片採取方向	めっき前後	$J_0$ (J)		脆性破面率 (%)	鋼種	$J_0$ (J)	脆性破面率 (%)
				Ave.	Ave.				
SN490C	断面 (1/4t)	L	前	240	3	HBL385C (t60)	229	17	
			後	284	0		231	22	
		C	前	203	7		221	17	
			後	200	12		196	25	
		表面 (表面下2mm)	前	236	0		236	7	
			後	220	0		204	22	
	表面 (表面下2mm)	L	前	283	0	SA440C	319	0	
			後	284	0		299	0	
		C	前	236	0		283	0	
			後	220	0		283	0	
		表面 (表面下2mm)	前	236	0		313	0	
			後	220	0		288	0	
SM520B-SNC	断面 (1/4t)	L	前	191	22	HBL385C (t40)	270	5	
			後	175	30		254	7	
		C	前	123	40		256	7	
			後	118	40		254	5	
		表面 (表面下2mm)	前	178	22		317	0	
			後	200	8		298	0	
	表面 (表面下2mm)	L	前	178	22	SA440C	325	0	
			後	200	8		313	0	
		C	前	138	28		285	0	
			後	130	25		288	0	
		表面 (表面下2mm)	前	178	22		313	0	
			後	200	8		288	0	
HBL385C (t40)	断面 (1/4t)	L	前	178	22	SA440C	325	0	
			後	200	8		313	0	
		C	前	138	28		285	0	
			後	130	25		288	0	
		表面 (表面下2mm)	前	178	22		313	0	
			後	200	8		288	0	
	表面 (表面下2mm)	L	前	178	22		325	0	
			後	200	8		313	0	
		C	前	138	28		285	0	
			後	130	25		288	0	
		表面 (表面下2mm)	前	178	22		313	0	
			後	200	8		288	0	

\*1 JFE スチール, \*2 角藤

\*1 JFE STEEL co., \*2 Kakuto co.