

## スタッド溶接において施工温度，母材板厚が溶接部の硬さに与える影響

### Effect of Construction Temperature and Plate Thickness on Hardness of Welded Zones of Stud Welding

前田 憲太郎 齋藤 繁 田沼 吉伸 高島 敏行 見山 克己

Kentaro MAEDA\*, Shigeru SAITO\*\*, Yoshinobu TANUMA\*,  
Toshiyuki TAKASHIMA\*\*\*, Katsumi MIYAMA\*\*

#### Abstract

This paper indicates evaluation results regarding Vickers hardness of some stud welding joints which were prepared under several cold temperatures. First, the effect of measurement position of Vickers hardness was described. 2 members (1 wide flange shapes (SS400), 1 plate (SS400)) were welded at  $-8^{\circ}\text{C}$ ,  $-4.4^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$  and  $5^{\circ}\text{C}$ . Max Vickers hardness ( $H_{vmax}$ ) by 2 measurement position were different. Second, the effect of construction temperature was considered. 6 members (3 wide flange shapes (SS400), 3 plate (SS400, SM490A)) were welded at  $+10$ ,  $+5$ ,  $0$ ,  $-5$  and  $-10^{\circ}\text{C}$ . The thickness of wide flange shapes specimens were 9, 15 and 17mm, and flat bar were 9, 16 and 25mm. The main results of Vickers hardness test were follow. 1) The defect of measurement position of Vickers hardness was found. 2) The relationship between Vickers hardness and carbon equivalent were linearly, but the effect of construction temperature was not found.

#### 1. はじめに

北海道などの寒冷地においては，冬期間の施工時温度が氷点下になる場合があり，日本建築学会鉄骨技術指針<sup>(1)</sup>では， $0^{\circ}\text{C}$ 以下で溶接を行う場合にはスタッド溶接部より 100mm の範囲の母材部分を  $36^{\circ}\text{C}$ 以上に予熱処理した上で，溶接することとなっている。これは，低温であれば急冷効果が高くなり，靱性が低下するためである。また，急冷効果は板厚の影響も受けることも考えられる。

文献(2)では，常温において板厚 (16, 32, 40, 50mm) および鋼種 (SM50, SS41, SM41, SM53, SM58) を変数としたスタッド溶接部のビッカース硬さの最高硬さ  $H_{vmax}$  と母材の炭素当量  $C_{eq}$  の関係に言及しており，板厚 32mm までは板厚が大きいほうが，硬さが低下する傾向が若干見られるが大きな影響はなく， $H_{vmax}$  と  $C_{eq}$  の関係は概ね(1)式の範囲にある事が示されており，文献(1)にも示されている。

$$H_{vmax} = 900 \cdot C_{eq} - 50 \pm 50 \quad (1)$$

文献(3)では鋼種 SM50A を 1 種類( $C_{eq}=0.42$ )，板厚 16mm，表面温度が常温， $0$ ， $-10$ ， $-20$ ， $-65^{\circ}\text{C}$ ，文献(4)では鋼種 SM50A を 1 種類( $C_{eq}=0.426$ )，板厚

25mm，温度条件 $+15$ ， $0$ ， $-15$ ， $-30$ ， $-45^{\circ}\text{C}$ ，文献(5)では SM50A を 4 種類( $C_{eq}=0.47$ ， $0.43$ ， $0.41$ ， $0.34$ )，板厚 25mm，温度条件 $+27$ ， $-10^{\circ}\text{C}$ として硬さ試験や引張試験を行い，板厚が等しい場合には常温と低温下では明瞭な差が見られないことが示されている。また，文献(5)では， $H_{vmax}$  と  $C_{eq}$  の関係に言及し，その関係は(1)式より大きくなり，概ね(2)式の範囲にある事が示されている。

$$H_{vmax} = 900 \cdot C_{eq} \pm 50 \quad (2)$$

スタッド溶接を行う場合は H 形鋼に溶接することも考えられ，表 1 中の図のようにウェブ上に溶接する場合もあるが，文献(2, 3, 4, 5)では母材は鋼板のみであり，母材形状の影響が明らかではない。また，板厚や母材形状と低温時の施工時温度との関係についても言及されていない。

一方，小梁のような梁幅の小さい部材を梁部材とし床と一体化させる合成構造とする場合，床材の一部となるデッキプレート（波形に成型された亜鉛めっき鋼板）を貫通してスタッドを母材である梁に溶接（貫通溶接）する事も多い。文献(6, 7)では，デッキプレートの板厚や亜鉛めっき量，梁材の塗装，デ

\*北海道科学大学工学部建築学科

\*\*北海道科学大学工学部機械工学科

\*\*\*北海道科学大学

デッキプレートと梁上フランジのクリアランス、スタッド直径等を変数とした溶接部の性能に関する実験を行っており、文献(7)では施工の目安となる数値を各変数の組合で求める評価式を提案しており、この評価方法は文献(1)にも示されている。ただし、低温下での施工については言及されていない。

筆者らはこれまで、スタッド溶接について、板厚や母材形状、鋼種、温度条件、デッキプレートの有無を実験変数として、試験体を作製し、溶接部の硬さ試験を行ってきた<sup>(8, 9, 10, 11)</sup>。

本論では、本学で行ってきた文献(8, 9, 10, 11)の結果を総合的に評価し、スタッド溶接において、

表 1 母材断面およびスタッド溶接位置

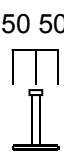

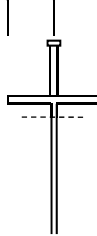
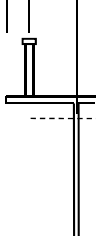
母材形状 および 溶接位置				
	板厚 t=9,16,25	H-250×125×6.5×9	H-600×200×11×17	H-300×300×10×15
母材名称	FB9,FB16,FB25	H9	H17	H15
母材系列	FB 系列 (平鋼)	H 系列 (H 形鋼)		
シリーズ	FB	HW, HWG	HW, HWG	HN

表 2 試験体概要

期	シリーズ	試験体 名称	母材 名称	鋼種	亜鉛 めっき 鋼板	施工温度(°C)					硬さ測定		機械的性質		
						15	5	0	-5	-10	二方向	水平	σy	σu	Y.R.
I	HW	HW9	H9	SS400	-	15	-	0	-5	-	○		341	450	0.757
	HN	HN15	H15	SS400	-	15	-	0	-5	-	○		296	465	0.637
	HW	HW17	H17	SS400	-	15	-	0	-5	-	○		301	438	0.688
II	HW	HW9	H9	SS400	-	-	2.3	-1.6	-5.2	-9.5	○		340	449	0.757
	HW	HW17	H17	SS400	-	-	4.8	-0.8	-6.2	-10.6	○		311	456	0.680
	HN	HN15	H15	SS400	-	-	4.2	-2.9	-6.6	-10.3	○		303	437	0.692
	FB	FB9	FB9	SS400	-	-	4	-0.3	-4.5	-8.9	○		283	-	-
III	HN	HN15	H15	SS400	-	-	5	0	-4.4	-8	○	○	-	-	-
	FB	FB9	FB9	SS400	-	-	5	0	-4.4	-8	○	○	-	-	-
IV	FB	FB9	FB9	SM490A	-	-	4.7	-2.4	-	-	○		384	532	0.722
	FB	FB16	FB16	SM490A	-	-	4.7	-2.4	-	-	○		380	524	0.725
	FB	FB25	FB25	SM490A	-	-	4.7	-2.4	-	-	○		388	522	0.743
	HW	HW9	H9	SS400	-	-	4.7	-2.4	-	-	○		276	430	0.642
	HWG	HWG9	H9	SS400	○	-	4.7	-2.4	-	-	○		276	430	0.642
	HW	HW17	H17	SS400	-	-	4.7	-2.4	-	-	○		300	444	0.676
	HWG	HWG17	H17	SS400	○	-	4.7	-2.4	-	-	○		300	444	0.676

表 3 IV期母材化学成分および炭素当量

	化学成分(%) (ミルシートより)										Ceq (%)
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V		
	×100			×1000		×100		×1000		×100	
FB9	15	37	139	16	4						40
FB16	15	39	140	15	4						40
FB25	16	38	140	17	5						41
H9	20	8	32	21	12						26
H17	15	20	68	19	9	1	2	5	1		28

施工温度：I期は計画温度、II期は鋼材表面温度、III、IV期は気温

機械的性質：I、II期は素材試験結果、IV期はミルシート値

単位 σy, σu : N/mm<sup>2</sup>, Y.R. : なし

施工温度、板厚およびデッキプレートの有無が溶接部に与える影響について考察することである。

## 2. 研究方法

### 2.1. 試験体

試験体の形状を表 1 に、鋼種および施工温度を表 2 に示す。変数は、鋼種、母材形状、施工温度、デッキプレートを模した亜鉛めっき鋼板の有無とする。試験体の作製は、4 期に分けて行った。

試験体に用いる母材形状は、平鋼（FB 系列）および H 形鋼（H 系列）とし、試験体は、母材に FB 系列を用いた FB シリーズ、母材に H 系列を用い（スタッドはすべてフランジに溶接）ウェブ上にスタッドを溶接した HW シリーズ（表 1 母材名称 H9, H17）、HW シリーズに亜鉛めっき鋼板を貫通して溶接する HWG シリーズ、母材に H 系列を用いウェブ上ではない位置に溶接（母材名称 H15）する HN シリーズの 4 シリーズを計画した。母材寸法は、FB 系列は板厚 9, 16, 25mm, H 系列は H-250×125×6.5×9, H-600×200×11×17, H-300×300×10×15 とした。鋼種は、FB 系列は SS400（Ⅱ、Ⅲ期）および SM490A（Ⅳ期）、H 系列は SS400 とした。頭付きスタッドにはφ16×120L を使用した。

HWG シリーズ（Ⅳ期）はデッキプレートを想定した溶融亜鉛めっき鋼板（以下めっき鋼板）を母材とスタッドの間に設置し貫通溶接を行った。めっき鋼板は、JIS G 3302 SGCC Z, めっき付着量 Z27, 板厚  $t=1.2\text{mm}$  を用いた。

施工計画時の施工温度は常温の 15, 5℃, 低温の 0, -5, -10℃の 5 種類である。表中の温度は、Ⅰ期は計画温度、Ⅱ期は施工時表面温度、Ⅲ、Ⅳ期は施工時気温を示す。溶接条件は、Ⅱ期は溶接電流 1220A, 溶接時間 0.7 秒, Ⅳ期は溶接電流 1250A, 溶接時間 0.7 秒とした。Ⅰ、Ⅲ期については記録が残っていないため、不明である。

使用した鋼材の機械的性質を表 2 に示す。Ⅰ、Ⅱ期は素材試験結果であるが、FB9 のみ平鋼のまま単純引張試験を行った結果であり、降伏点のみ示す。Ⅳ期は、ミルシートに示された値である。Ⅳ期に使用した鋼材の化学成分および炭素当量  $C_{eq}$  を表 3 に示す。 $C_{eq}$  は、ミルシートに記載された値であるが、FB シリーズは  $C_{eq}$  および化学成分 Ni, Cr, Mo, V の記載がないため、Ni, Cr, Mo, V は 0 として、記載のあった C, Si, Mn を用いて求めた。したがって、実際には、より大きな値となると考えられる。

### 2.2. ビッカース硬さ試験

ビッカース硬さ試験を行うため、表 1 に示すスタッド溶接時の試験体を高速切断機で 25mm 角に切断（図 1）し、高さが 25mm になるようスタッドを切断、それをスタッド側から母材側にかけて両断し、エメリー研磨（手動）で研磨後、自動研磨機にかけ研磨したものにエッチングを施し、断面マクロ観察を行った。また、25mm 厚の平鋼において、ビッカース硬さ試験を行うため、熱の影響を受けていない下端から切断した。

ビッカース硬さ試験を行う断面の詳細を図 2 に示す。硬さ試験の測定位置は、図 2 に示すように、文献(8)等で測定した 2 方向測定および文献(3)にて測定している水平測定の 2 種類とする。2 種類の測定方法を計画したのは、溶接部の硬さの分布を詳細に観察するために 2 方向測定を行ったが、最大硬さ  $H_{vmax}$  と炭素当量  $C_{eq}$  の関係に言及している文献(1, 2, 5)では水平測定であり、測定位置でどの程度異なるかを把握するためである。

条件は負荷荷重を 4.9N とし、荷重負荷時間は 20s, 荷重負荷速度を 50 $\mu\text{m}/\text{sec}$  とした。また、ビッカース硬さ試験の圧痕の位置は、図 2 に示す 2 方向測定（Ⅰ～Ⅳ期）および水平測定（Ⅲ期）とした。2 方向測定の圧痕間隔は図 3 のように始点（スタッド側）

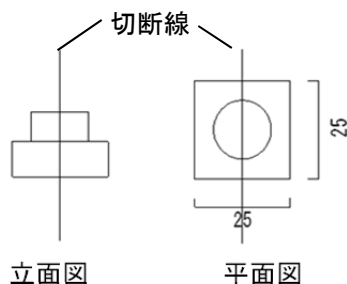


図 1 ビッカース硬さ試験用試験片概要

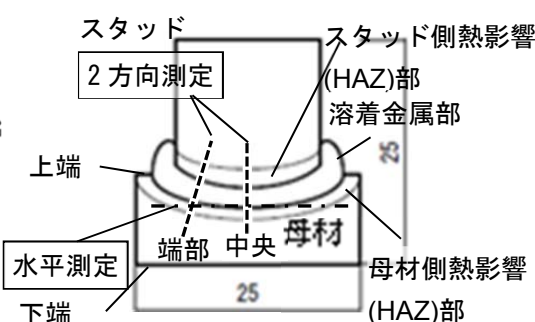


図 2 硬さ測定試験片

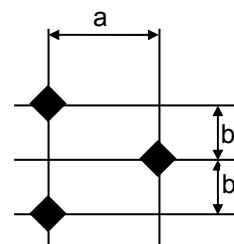


図 3 硬さ測定位置詳細

から右に a, 下に b の位置に打ち, そこから左に a, 下に b の点に打つことを繰り返した. I, II 期では  $a=500\mu\text{m}$ ,  $b=200\mu\text{m}$ , III 期では  $a=650\mu\text{m}$ ,  $b=380\mu\text{m}$ , IV 期では  $a=700\mu\text{m}$ ,  $b=350\mu\text{m}$  とした. 水平測定 (III 期) での圧痕間隔は, 圧痕の対角線距離 d の 3 倍程度となるように測定し, 概ね  $400\sim 600\mu\text{m}$  間隔とした.

2 方向測定では, 端部を計測する際に中央部から 30 度の角度を付け, 中央部よりやや高い位置から計測した. 計測を終える地点は, 母材側熱影響部を過ぎ, 計測する数値が安定した時点で終了とした.

### 3. 実験結果

#### 3.1. マクロ観察結果

マクロ試験結果の一部を写真 1 に示す. めっき鋼板貫通試験体の幾つかで溶融金属部での気泡欠陥が認められた. めっき鋼板の有無や温度にかかわらず, 溶着金属部に空隙や, フラッシュとスタッド軸部の間に空隙が見られる試験体が見られた. 溶着金属部の空隙については, スタッド溶接を工場内の入り口付近で溶接したため, 風により雪がフランジ表面に付着したためと考えられる. なお, II 期では図 4 に示すような溶接部のせん断試験も行い, 空隙がある試験体についてもせん断性能に影響がないことを確認している<sup>(9)</sup>.

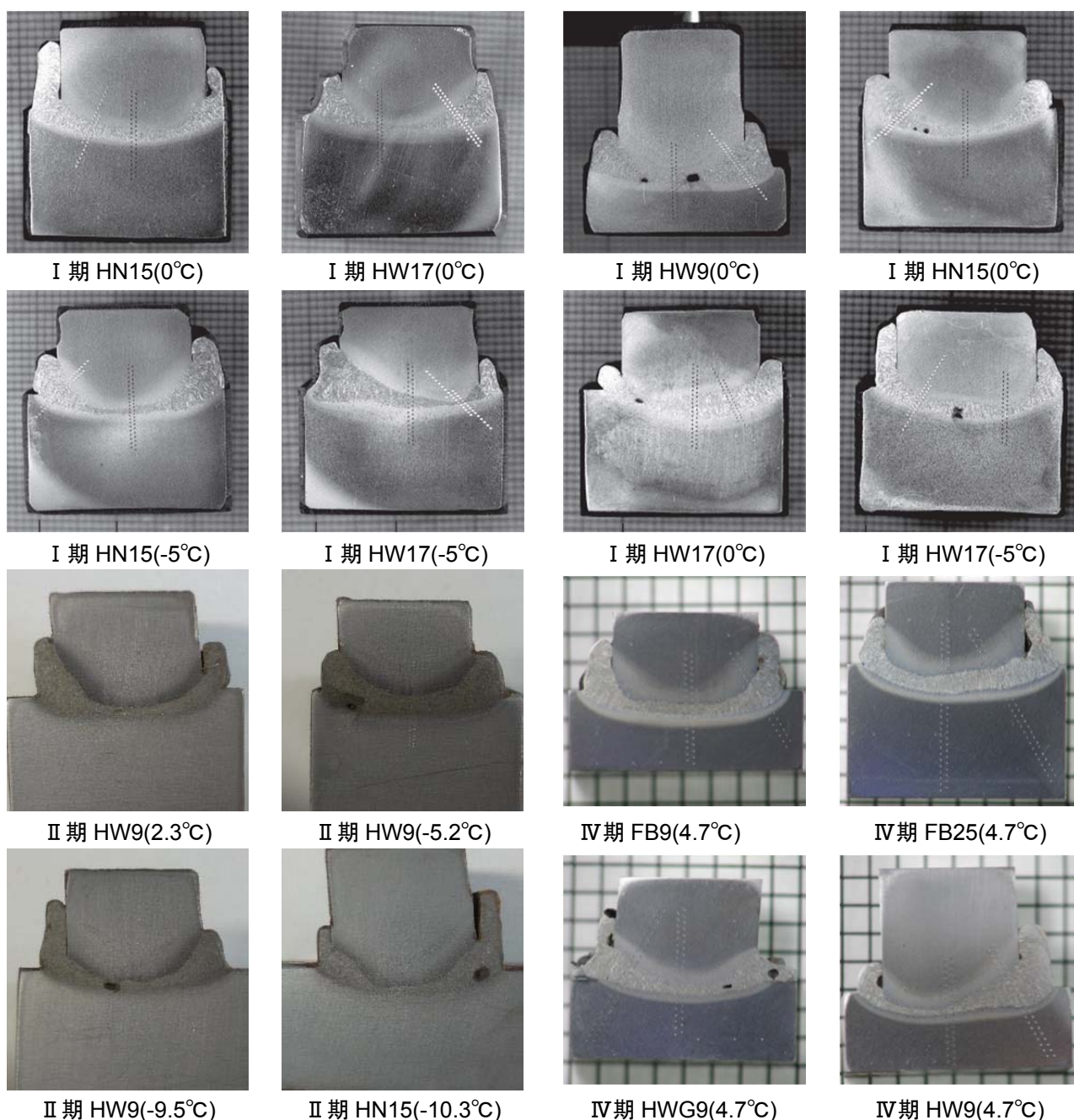


写真 1 マクロ試験例

Ⅳ期の一部の試験体において、マクロ試験結果より母材表面から母材側熱影響部（母材 HAZ 部）の最大深さを測定した結果と母材板厚の関係を図 5 に示す。凡例は、表 2 のシリーズである。母材 HAZ 部の深さと母材板厚には関係は見られない。また、HWG シリーズが HW シリーズに比べ HAZ 深さが浅くなっているが、これは、母材上端を深さ測定の原点としているため、めっき鋼板の厚さの影響により、浅く測定されていると考えられる。

## 3.2. ビッカース硬さ試験結果

### 3.2.1. ビッカース硬さ測定位置について

#### 3.2.1.1. 水平測定と 2 方向測定の比較

ビッカース硬さ試験の最高硬さについて、水平測定と 2 方向測定による最高硬さの違いについて検討する。Ⅲ期に行った試験であり、同一条件の試験体を複数個作製し硬さ測定を行った。試験体毎に、水平測定と 2 方向測定の端部、中央部それぞれの最高硬さの最大値、同一条件試験体の平均値および 2 方向測定の最高硬さ（中央部と端部それぞれの平均値の最大値）を求めた。さらに、2 方向測定の最高硬さを水平測定最高硬さ平均値で除した最高硬さ

比を求めた。すべての試験体においてビッカース硬さが 350Hv を超えるものはなかった。

同一シリーズの試験体毎に、測定位置毎の最高硬さの平均値を図 6 に示す。横軸は施工温度、母材名称を示す。

最高硬さ比（2 方向/水平）を図 7 に示す。最高硬さ比（2 方向/水平）は、板厚 15mm の母材系列 H15 では 1.1～1.2 倍程度、板厚 9mm の母材系列 FB9 では 1.0～1.1 程度となっている。施工温度の明瞭な影響は見られない。2 方向測定に比べ、水平測定の値が低くなる原因として、溶接部端部ほど急冷効果が高くなり母材熱影響部の硬さが高くなることから予測され、水平測定ではこの位置を測定していないためと考えられる。また、H15 より FB9 の試験体が最高硬さ比は小さい。これは、板厚によっても溶接時の冷却速度が異なることが考えられるためであり、板厚の影響についても今後検討が必要である。

#### 3.2.1.2. 2 方向測定の端部と中央部の比較

ビッカース硬さ試験結果より、試験体毎に中央部の最高硬さを端部の最高硬さで除した値と施工時気温との関係を図 8 に、中央部の最高硬さを端部の

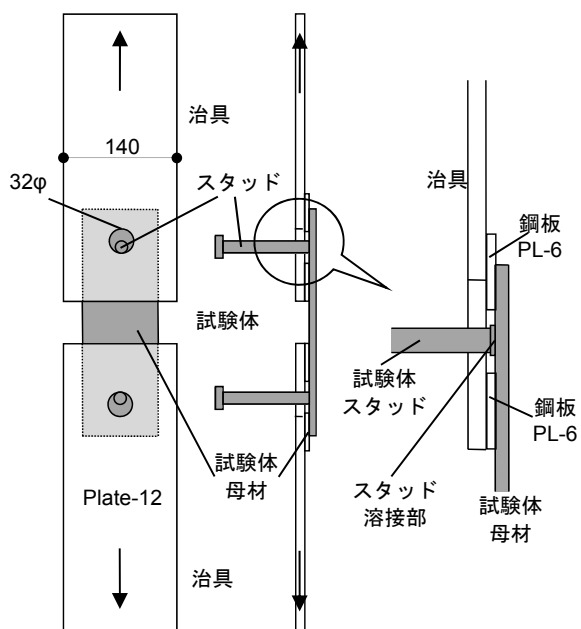


図 4 せん断試験概要<sup>(9)</sup>

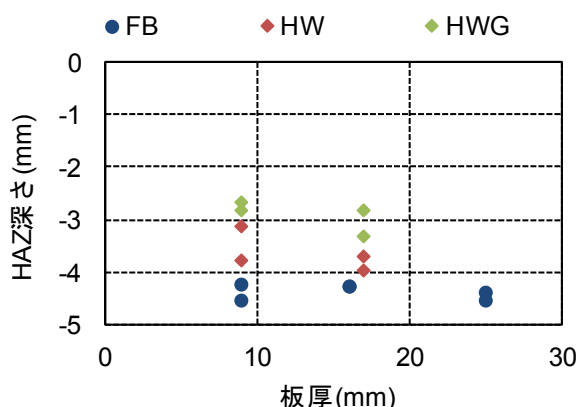


図 5 母材 HAZ 深さと母材板厚の関係

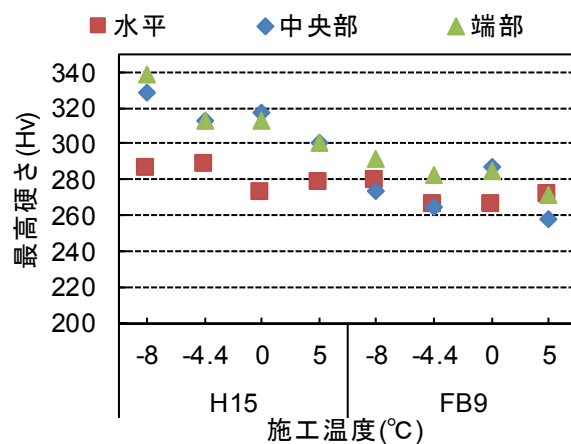


図 6 最高硬さ

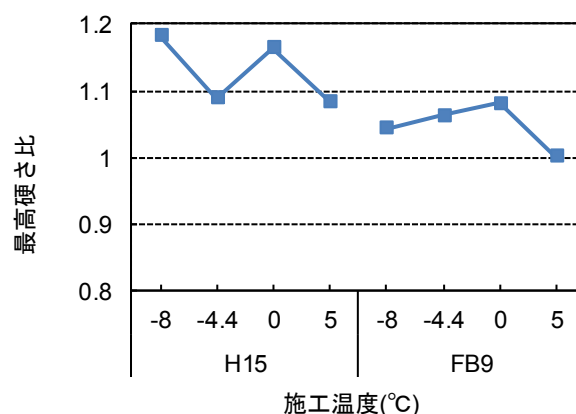


図 7 最高硬さ比（2 方向/水平）

値で除した硬さ比（中央部/端部）と施工時気温の関係を図9に示す。凡例は、表2の試験体名称である。端部が中央部に比べ高くなる試験体が多いが、中央部が高い試験体も見られる。硬さ比（中央部/端部）は0.81～1.23とばらつきがあるが、施工時気温、板厚、母材形状との関係は見られない。以降の考察において、最高硬さは2方向測定の際の端部、中央部の最大値を用いることとする。

### 3.3. ビッカース硬さと炭素当量

文献(1, 2, 5)等では、溶接部のビッカース硬さの最高硬さ  $H_{vmax}$  は炭素等量  $C_{eq}$  に比例する傾向が示されている。本研究でも、同様に  $H_{vmax}$  と  $C_{eq}$  との関係について検討する。ただし、Ⅰ, Ⅱ期は炭素等量  $C_{eq}$  が不明である。引張強さは炭素量に依存するため、ある程度関係性があると考えられる。そこで、Ⅳ期の試験体および筆者らが保管していた他の鋼材のミルシートに記載された引張強さ  $\sigma_u$  と  $C_{eq}$  ( $C_{eq}$  および化学成分 Ni, Cr, Mo, V の記載がないものは、Ni, Cr, Mo, V は0として、記載のあった C, Si, Mn を用いて求めた値) の関係を直線近似により求めた (図10) 結果、(3)式を得た。

$$C_{eq} = 0.1565 \cdot \sigma_u - 41.716 \quad (3)$$

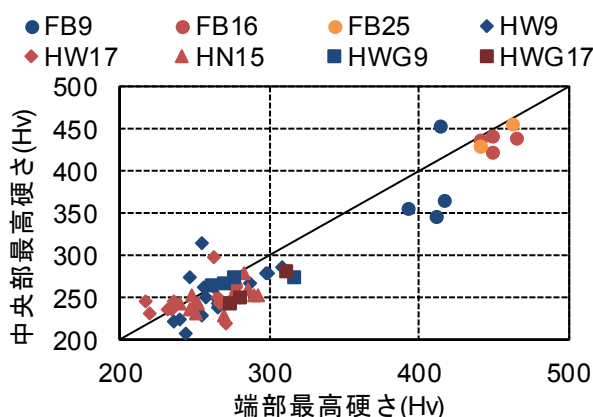


図8 端部と中央部の最高硬さ

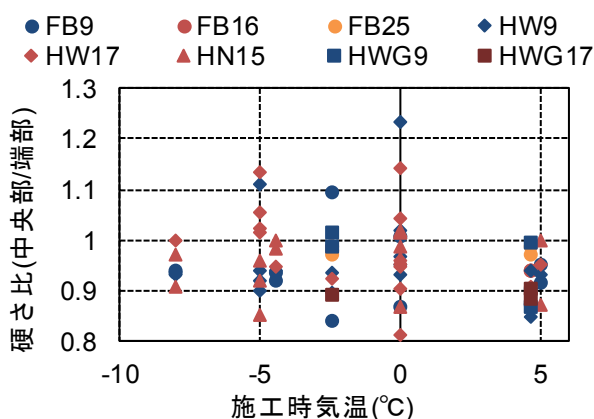


図9 硬さ比(中央部/端部)と施工時気温

Ⅰ, Ⅱ, Ⅳ期の最高硬さ  $H_{vmax}$  と  $C_{eq}$  を図11に示す。ここで、Ⅰ, Ⅱ期の  $C_{eq}$  は(3)式による。

ビッカース最高硬さと  $C_{eq}$  は、概ね比例関係にあり、その関係は文献(1, 2, 5)の関係式を参考にし、(4)式の範囲と考えられる。

$$H_{vmax} = 900 \cdot C_{eq} + 25 \pm 75 \quad (4)$$

ここで、(4)式を基に  $C_{eq}$  より求められる最高硬さの基準となる値  $H_v^*$  として(5)式を用い、実験より求められた  $H_{vmax}$  を  $H_v^*$  で除した値と施工時気温の関係を図12に示す。

$$H_v^* = 900 \cdot C_{eq} + 25 \quad (5)$$

$H_{vmax}/H_v^*$  はばらつきが多く、気温、板厚、母材形

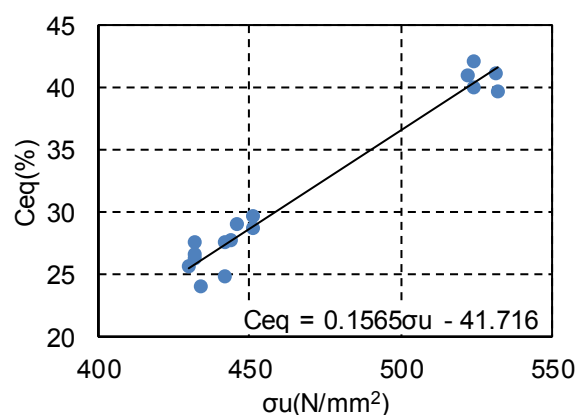


図10  $C_{eq}$  と  $\sigma_u$  の関係

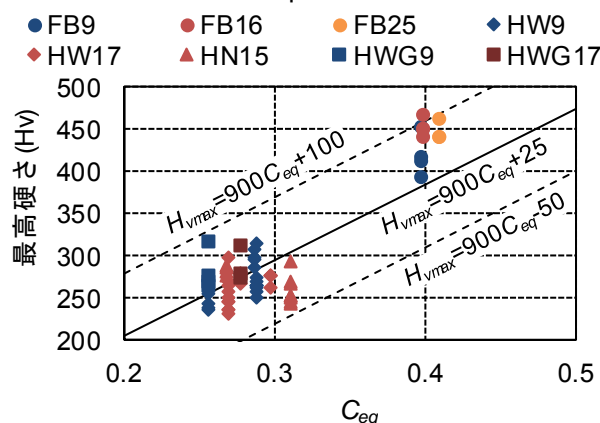


図11 最高硬さと炭素当量

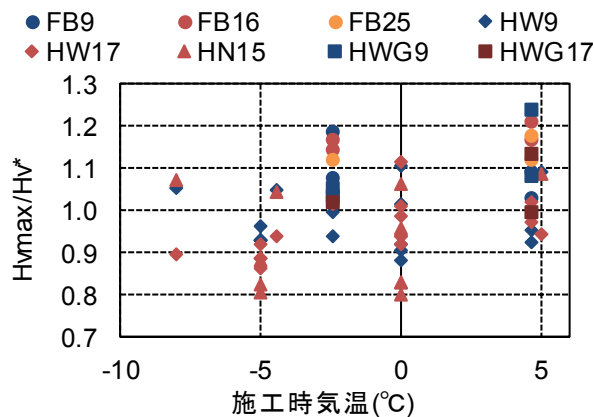


図12  $H_{vmax}/H_v^*$  と施工温度

状およびめっき鋼板の有無との明瞭な関係は見られない。

#### 4. まとめ

本研究の結果は、以下のように要約される。

- 1) 2方向測定により測定したビッカース最高硬さは、水平測定により測定した値に比べ、1.0~1.2倍程度の値となることが確認できた。
- 2) 施工温度による2方向測定による最高硬さへの影響は、本試験の範囲では確認できなかった。
- 3) デッキプレートを想定した溶融亜鉛めっき鋼板を貫通した試験体と溶融亜鉛めっき鋼板を用いない試験体を比較すると、硬さについては明瞭な影響は見られなかった。
- 4) 炭素当量とビッカース最高硬さは比例関係にあり文献(1, 2, 5)の関係に比べ高くなるが、ビッカース硬さ試験の測定位置の違いを考慮すると1.2倍程度の硬さとなる。ただし、測定位置の影響は、板厚による影響を受ける可能性が考えられるため、板厚や施工温度による冷却速度の影響や最大硬さの出現位置など検討が必要である。

#### 参考文献

- (1) 日本建築学会：鉄骨工事技術指針・工場製作編，2007.2
- (2) 初瀬隆司，長尾直治，尾形素臣，谷口徹，中辻照幸：厚板高張力鋼に対するスタッド溶接の影響について，日本建築学会大会学術講演梗概集 構造系，pp.1477-1478，1983.9
- (3) 秋山茂雄，木村義正，伊東真人：低温度下におけるスタッド溶接の性能試験，日本建築学会大会学術講演梗概集，C(構造Ⅲ)，pp.1279-1280，1989.10
- (4) 長尾直治，真喜志卓，蜷川利彦，河野六郎，沢田宏平，矢幡秀介：低温度下におけるアークスタッド溶接の研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，C(構造Ⅲ)，pp.903-904，1988.10
- (5) 長尾直治，河野六郎，大隈哲夫，渡邊一夫，矢幡秀介，堀継夫，伊藤輝男，蜷川利彦：低温度下におけるアークスタッド溶接の研究：その2. 炭素当量をパラメータとした実験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，C(構造Ⅲ)，pp.1277-1278，1989.10
- (6) 尾形素臣，長尾直治，初瀬隆司，谷口徹，中辻照幸：デッキプレート貫通スタッド溶接について，日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)，pp.1475-1476，1983.9
- (7) 高橋正明，斉田和男，中辻照幸：スタッドジベルのデッキプレート貫通溶接の品質と母材に与える影響について，日本建築学会関東支部研究報告集 構造系 (51)，pp.261-264，1980
- (8) 前田憲太郎，田沼吉伸，高島敏行，齋藤繁，谷吉雄：スタッド溶接の低温施工下施工による影響，鋼構造年次論文報告集第15巻，653-658，2007.11
- (9) 前田憲太郎，田沼吉伸，草薙敏夫，高島敏行，齋藤繁：低温施工下におけるスタッド溶接部の硬さ分布，鋼構造年次論文報告集，第19巻，pp.209-214，2011.11
- (10) 前田憲太郎，田沼吉伸，高島敏行，見山克己，齋藤繁：母材板厚がスタッド溶接部の硬さに与える影響，鋼構造年次論文報告集第23巻，鋼構造協会，pp.739-744，2015.11
- (11) 前田憲太郎，齋藤繁，田沼吉伸，高島敏行，見山克己：スタッド溶接の施工温度と溶接部のビッカース硬さに関する検討，鋼構造年次論文報告集第24巻，鋼構造協会，pp.739-744，2016.11