

柱梁接合部における多層溶接金属の靱性支配因子 —柱状組織分率によるYGW18溶接金属の靱性評価—

Metallurgical Controlling Factors for Toughness of Multi-layered Weld Metal in Beam-to-column Connections – Application of Fraction of Columnar Structure in Assessing Toughness of Weld Metal Derived from YGW18 Solid Wire –

橋 場 裕 治^{* (1)} 長谷川 俊 永^{* (2)} 大 北 茂^{* (2)} 吉 田 讓^{* (3)}
 Yuji HASHIBA Toshiei HASEGAWA Shigeru OHKITA Yuzuru YOSHIDA
 志 村 保 美^{* (4)}
 Yasumi SHIMURA

抄 録

シャルピー吸収エネルギーにばらつきが生じる原因として溶接金属組織の不均質性を考慮し、柱梁接合部の多層溶接金属の靱性支配因子を検討した。シャルピー衝撃試験片のノッチ部に含まれる原質部の割合を柱状組織分率(α_c)と定義し、YGW18溶接金属において、 α_c 一定(0%および80%)として溶接金属の不均質性を極力排除した継手試験を行った。組織不均質性の指標としての α_c の妥当性を検証するとともに、溶接金属靱性に及ぼす入熱量、パス間温度の影響の明確化を試みた。

Abstract

Metallurgical controlling factors for toughness of multi-layered weld metal in beam-to-column connections were investigated by considering the heterogeneity of microstructure as a dominant factor of scatter of Charpy absorbed energy. The fraction of as-welded zone of weld metal included in notch part of the test piece for Charpy impact test was defined as fraction of columnar structure (α_c). Charpy impact test for the weld metal was examined with constant α_c (α_c : 0% and 80%) to reduce the heterogeneity of microstructure as much as possible. The validity of α_c as an index of heterogeneity of microstructure was verified, and the clarification of the influence of heat input and interpass temperature on the toughness of weld metal was tried.

1. 緒 言

柱梁接合部は鋼構造建築物の耐震性能を決定する重要部位である。特に兵庫県南部地震以降、耐震性能に対する意識の高まりにより、溶接部性能の確保について多くの研究^{1)~11)}がなされ、より厳格な対応を行ってきている。近年では脆性破壊を防止する観点から、建築物の必要性能、構造部材の作用応力に応じて鉄骨柱溶接部の要求品質を部位ごとにきめ細かく設定する考え方が示されているが、柱梁接合部の必要靱性はそれ以前の設計水準よりも高くなり、0℃シャルピー吸収エネルギー(vE_0)として70J以上の靱性を要求されることが一般的となってきた¹⁾。

柱梁接合部の施工には、一般に炭酸ガスアーク溶接による多層溶接が多用され、溶接材料には通常、ソリッドワイヤであるJIS Z 3312 YGW11またはYGW18が用いられている。

鉄骨ファブリケータにおける施工については、過大な入熱量の適

用あるいはパス間温度の上昇による溶接部性能の劣化を防止するために、施工時に適用する入熱量とパス間温度に上限値が規定されている。溶接金属の機械的性質を決定する主要な要素は、溶接金属の化学成分および熱履歴(冷却速度)であり、適用溶接材料の種類に応じた入熱量およびパス間温度の上限値を規定した施工管理方法が現在、主流となっている。

一方、施工能率の観点では、入熱量とパス間温度に上限を設けることは、単位時間あたりの溶着量の低下と、溶接部の冷却待ちによる大幅な能率の低下を招くことになる。合理的な施工を追求するには、要求された溶接金属性能を得るのに最適な溶接条件を導く予測手段を得ておくことが望ましい。

また、溶接材料開発の観点からは、溶接金属性能と冷却速度の関係を明確にすることが重要な知見となるが、溶接金属の0℃シャルピー吸収エネルギーは、溶接材料と溶接条件(入熱量、パス間温度)の組合せにより大きなばらつきを伴う場合もあることが、過去の試験

* (1) 鉄鋼研究所 接合研究センター 主任研究員
 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL:(0439)80-3131

* (2) 鉄鋼研究所 接合研究センター 主幹研究員 工博

* (3) 厚板営業部 マネジャー

* (4) 建材開発技術部 マネジャー

結果において示されている²⁾。吸収エネルギーのばらつき原因として、一つ目は、当該溶接金属の延性 - 脆性遷移温度が0℃付近であった可能性が挙げられ、二つ目は、多層溶接特有の多重の熱履歴および積層状態のばらつきにより、シャルピー試験片のノッチ部に含まれる溶接金属組織が試験片ごとに必ずしも一様とはならないことが挙げられる。

そこで本研究では、建築分野の柱梁接合で現在多用されているYGW18溶接材料について、溶接金属のシャルピー吸収エネルギーと冷却時間の関係について調査し、その際、多層溶接特有の熱履歴による組織の不均質性を靱性支配因子と捉え、ノッチ部に含まれる溶接金属のマクロスケールでの組織分率とシャルピー吸収エネルギーを関係づけることにより、マクロスケールでの組織不均質性を考慮することで、溶接金属靱性と冷却速度との関係をより明確化することを試みた。

2. 柱状組織分率 α_c の導入

溶接金属の機械的性質は、化学成分および入熱量、パス間温度などの熱的条件で定まる冷却速度により決定される組織に依存するが、本研究では、ノッチ部に含まれる組織が試験片ごとに異なるため、多層溶接金属のシャルピー吸収エネルギーにばらつきが生じると仮定した。すなわち、多層溶接では後続パスにより先行パスの原質部組織は再熱を受け、その結果、原質部とは異なる機械的性質を持つ再熱組織が生じるが、継手板厚方向での試験片採取位置を統一しても、溶接金属の積層状況、施工条件の外乱要因が加わることで評価対象の溶接ビードごと、あるいは個々のシャルピー試験片ごとに、ノッチ部に含まれる溶接金属の原質部と再熱部の比率が異なっていると考えられる。

そこで、試験片ごとに異なると考えられる溶接金属組織の不均質性を表現する指標として、柱状組織分率 (α_c) を定義した。図1に模式図を示す。シャルピー試験片のノッチ部に含まれる評価対象の溶接金属組織を、柱状組織を呈する“原質部”と、それ以外の主として粒状組織を呈する“再熱部”の2つに大別した。金属組織学的にはより厳密な組織分類が定義されるべきであるが、できるだけ簡素な指標を定義することを重視し、便宜上、組織を大きく2つに分類するに留めた。そして、シャルピー試験片のノッチ部に位置した組織のうち、全体に対する原質部の存在比率 ($\alpha_c \equiv$ 原質部 / (原質部 + 再熱部)) をその試験片における柱状組織分率と定義した。

Test piece for Charpy impact test

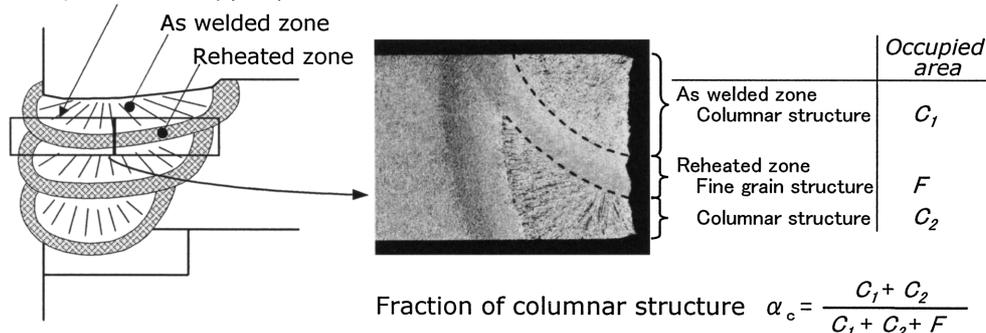


図1 柱状組織分率の定義
Definition of fraction of columnar structure

3. 実験方法

3.1 YGW11およびYGW18多層溶接金属の靱性ばらつきの調査

YGW18溶接金属の冷却時間とシャルピー吸収エネルギーの関係を求めるのに先立ち、YGW11およびYGW18溶接金属について、シャルピー吸収エネルギーのばらつきや、各試験片における α_c の変動について実態を調査するための試験を実施した。

作製したT継手試験体(溶接長300mm)の形状と寸法を図2(a)に示す。スキンプレートに対応する板厚は一定(36mm)とし、梁フランジ相当部材の板厚(t)を4種類(19, 25, 32, 40mm)、また、開先角度を3通り(25°, 30°, 35°)に変化させている。鋼材はSN490鋼とし、溶接材料はソリッドワイヤ、YM-26およびYM-55C(それぞれJIS Z 3312 YGW11, YGW18, 日鐵住金溶接工業(株)製, 1.4mm ϕ)の2種類を用いた。

溶接施工は下向姿勢の半自動炭酸ガスアーク溶接にて連続折り返しによる多層溶接を実施した。柱梁溶接部の実施工では、ルート部のパスは表層部に比較してより低入熱が適用されるなど、必ずしも一定の入熱量で溶接されないため、本試験でも各パスの入熱量を統一しなかった。積層要領は、最終層はすべての試験体で1層2パス

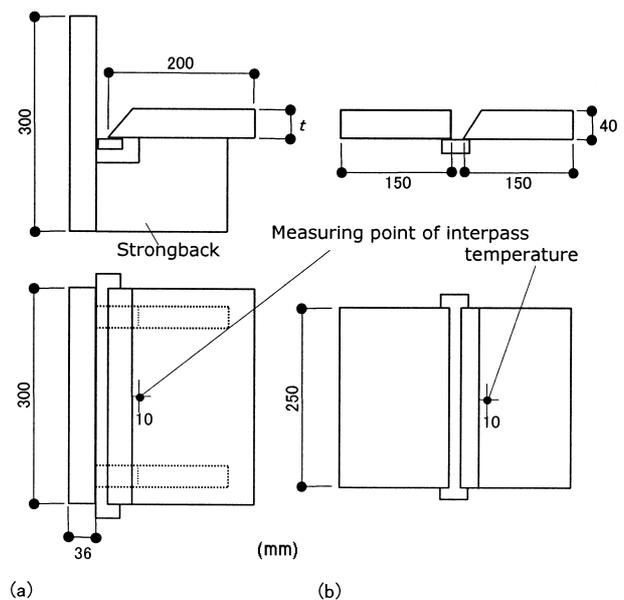


図2 試験体形状 (a) T継手試験体, (b) 突合せ継手試験体
Schematic illustration of test joint geometry (a) T-shape test joint, (b) Butt test joint

表1 試験体継手溶接条件
Welding conditions of test joints

No.	Welding Wires	Plate thickness (mm)	Groove angle (°)	Welding conditions					Build-up conditions*	
				Total pass	Current (A)	Voltage (V)	Heat input (kJ/mm)	Maximum interpass temperature (°C)		
1901	YGW11	19	25	4	380	40	2.3-3.1	470	D1	
1902			30	4	400	40	2.3-3.3	491		
1903			35	5	400-410	42	2.7-3.7	516		
2502		25	30	6	420	44	3.2-4.0	513		
2503			35	7	400-420	44	2.4-3.6	553		
3202		32	32	30	8	380	42	2.7-4.6		502
3203				35	8	360-400	42	2.2-4.8		520
3204				25	11	300-420	32-46	1.2-3.2		≥350
3210				30	11	340-390	40	2.6-4.1		550
3211				25	8	390-420	42	2.7-3.6		440
3213				30	8	380-440	42	2.5-3.8		485
4002				40	30	9	400	42		2.7-5.9
4003		35	10		380-420	42	2.7-5.3	599		
3206		YGW18	32		25	8	300-400	32-44		1.7-3.8
3207	25			8	300-400	33-44	1.8-4.1	-		
3208	30			8	380-400	44	1.9-3.9	-		
3209	30			8	380-400	44	2.1-3.4	-		
3215	25			9	360-410	42-40	2.2-3.6	-		
3216	30			9	360-420	40-42	2.5-4.2	530		

* Build-up conditions

D1 Dual-pass per layer only in final layer

D2 Dual-pass per layer after reaching an interpass temperature of 350°C

としたが、最終層より前の層までは、1層1パス溶接を行う場合(表1中、積層条件D1)に加え、パス間温度が350°Cに到達した後に1層2パスにて振り分け溶接を行う場合(表1中、積層条件D2)の2通りとした。

板厚、溶接材料、開先角度の組合せ、および、入熱量と最高パス間温度等、溶接条件の実績を表1に示す。1/4t位置に対応するパスの入熱量は、YGW11では板厚19、25mmにおいて3.0~3.3kJ/mm、板厚32、40mmにおいては、それぞれ2.0~4.2、4.9~5.1kJ/mmの範囲、YGW18ではすべて板厚32mmであり、2.8~3.5kJ/mmの範囲であった。

シャルピー試験片は、梁フランジ部材の表層部側の1/4t位置より採取し、板厚32mm、40mmの試験体では、1/4tに加え、ルート近傍側の3/4t位置からも採取した。ノッチ位置はすべて溶接金属の中央とした。

3.2 柱状組織分率を一定としたYGW18多層溶接金属の靱性の調査

次に、YGW18溶接金属を対象に、施工上の外乱を極力排除した継手試験を行い、かつ、同一溶接条件の継手に対し、柱状組織分率 α_c を一定とした試験片を採取してシャルピー試験を実施した。これは、組織不均質性の指標としての柱状組織分率の妥当性を検証するとともに、入熱量、パス間温度および800~500°C冷却時間との相関を求め、溶接金属靱性に及ぼす入熱量、パス間温度の影響の明確化を試みたものである。

試験体は柱梁溶接部を模擬した突合せ継手(溶接長250mm)とした。形状と寸法を図2(b)に示す。鋼材はSN490鋼(板厚40mm)、溶接材料はYM-55C(JIS Z 3312 YGW18、日鐵住金溶接工業(株)製、

1.4mm ϕ)を用いた。溶接条件は、入熱量を3.0、4.0、5.0kJ/mmの3水準とした。パス間温度は、350、400、450、500°Cの4水準とし、入熱量との組合せにより計11条件とした。施工に関する外乱要因を極力小さくするため、すべてのパスを同一入熱量で溶接した。パス間温度を通常の実施工よりも高温側に設定したことから、また、試験片を採取する最終層付近において設定パス間温度を安定的に実現する目的で、溶接開始前に試験体を炉内で350°Cに均熱予熱した後、ロボットを用いた全自動溶接により、各設定入熱量、パス間温

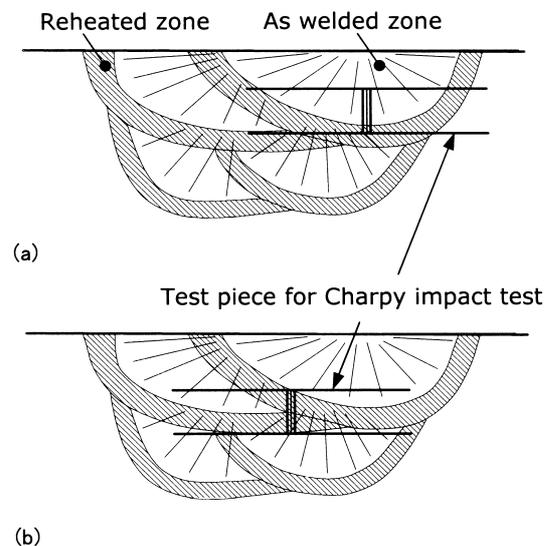


図3 シャルピー試験片採取位置 (a) $\alpha_c=80\%$, (b) $\alpha_c=0\%$
Position of test pieces for Charpy impact test (a) $\alpha_c=80\%$, (b) $\alpha_c=0\%$

度での管理溶接を行った。

パス間温度管理のための測温位置は、溶接長中央の開先上端より10mm離れた板表面上とした。また、溶接金属における熱履歴は、熱電対を溶融池に挿し込むことで測定し、より正確な800-500℃冷却時間を求めた。

シャルピー試験片は α_c が0%(再熱部100%)および80%(ほぼ原質部相当)となるようにマイクロ組織観察を行いながら、図3の模式図に示すように正確にノッチ位置を定めて採取した。

4. 実験結果および考察

4.1 YGW11およびYGW18多層溶接金属のシャルピー吸収エネルギーのばらつき

まず、3.1項の実験について得られた結果を示す。本試験で用いられたYGW11およびYGW18溶接材料では、溶接金属の炭素当量はYGW11で $C_{eq}=0.271\sim 0.296\text{mass}\%$ の範囲、およびYGW18で $C_{eq}=0.328\sim 0.365\text{mass}\%$ の範囲であった。なお、炭素当量 C_{eq} は $C_{eq}=C+Mn/6+Si/24+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14$ により求めた。

試験後のシャルピー試験片の破断片に対し、ノッチ部の組織観察を行い、個々のシャルピー試験片について α_c を求めた。図4に0℃シャルピー吸収エネルギー(vE_0)と α_c の関係を示す。

本試験で得られたYGW18溶接金属では、広範囲の α_c に対し、70J以上の良好な0℃シャルピー吸収エネルギーが安定して得られ、ばらつきの範囲も小さい。 α_c が大きくなると vE_0 がわずかに低下する傾向が認められる。

YGW11溶接金属では、YGW18に比較してばらつきは大きいですが、YGW18溶接金属と同様、 α_c が大きくなると吸収エネルギーが低下する傾向が見られた。これは原質部と再熱部の靱性差に起因すると考えられ、原質部に比較して微細となった再熱組織の方が、靱性が向上した可能性を窺わせるものである。

当初、ばらつきの主要な原因が、 α_c のばらつきにあると考えて図4の整理を行ったが、特にYGW11溶接金属では、 α_c と vE_0 との関係は大きなばらつきを示しており、他の要因も無視できないものと言える。本試験では試験片採取位置の施工条件(入熱量、パス間温度、積層条件等)が一定でなかったことが vE_0 が α_c だけで整理できない理由のひとつと考えられる。

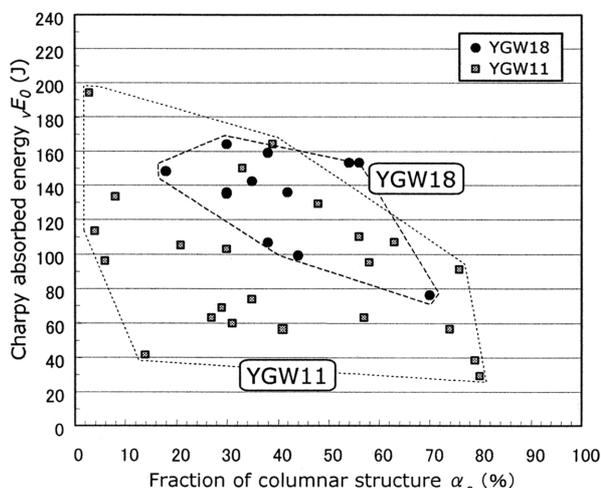


図4 溶接金属の0℃シャルピー吸収エネルギーと柱状組織分率の関係
Relationship between Charpy absorbed energy and fraction of columnar structure

4.2 柱状組織分率を一定としたYGW18多層溶接金属のシャルピー吸収エネルギー

本項は、前項での vE_0 のばらつき要因のひとつとして考えられた、溶接条件(入熱量、パス間温度)の変動を極力小さくした3.2項の実験結果を示す。

vE_0 を入熱量およびパス間温度によって整理した結果を図5に示す。 α_c が一定の条件のもとでは、従来、入熱量あるいはパス間温度に対してばらつきを示していた vE_0 が層別され、入熱量の増加、パス間温度の上昇に伴い vE_0 が低下する傾向が明確に示されている。YGW18多層溶接金属は、ほぼすべての溶接条件において α_c が小さい方が、すなわち再熱部を多く含む方が vE_0 は低下しており、 $\alpha_c=80\%$ における vE_0 (以降、 $vE_0(\alpha_c=80\%)$ と表記する)と $\alpha_c=0\%$ における vE_0 (以降、 $vE_0(\alpha_c=0\%)$ と表記する)の差は最大で40J程度である。

従って、実施工においては、多層溶接のビードごとに入熱量やパス間温度が変動しており、さらに、シャルピー試験片のノッチ位置の原質部と再熱部の組織比率が一定でないことで、溶接金属の靱性のばらつきが大きく生じるものと結論される。また、 α_c の増加に伴い、YGW18溶接金属の靱性が前項4.1の試験において若干低下す

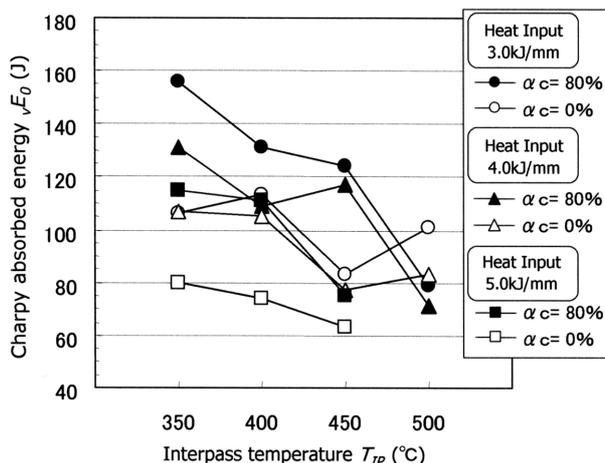


図5 0℃シャルピー吸収エネルギーと溶接条件の関係
Relationship between Charpy absorbed energy and welding condition

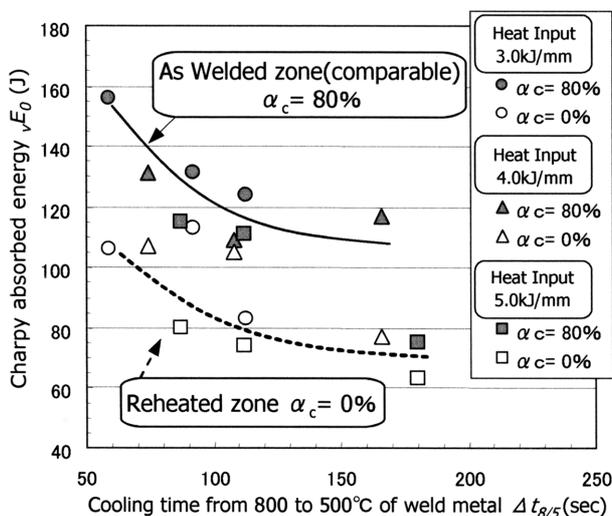


図6 0℃シャルピー吸収エネルギーと800-500℃冷却時間の関係
Relationship between Charpy absorbed energy and cooling time from 800 to 500℃

る傾向が示されていたのは、試料採取位置における入熱量およびパス間温度の変動の影響が現れたものと解釈できる。

800–500℃冷却時間($\Delta t_{8/5}$)と vE_0 の関係を図6に示す。 $\Delta t_{8/5}$ の増加に伴い、 vE_0 ($\alpha_c=80\%$)、 vE_0 ($\alpha_c=0\%$)ともに低下する傾向を示した。本試験の実施範囲では、 α_c ごとには、800–500℃冷却時間と vE_0 には相関が認められ、溶接金属靱性に及ぼす入熱量、パス間温度の影響はともに冷却時間の変化に起因したものと確認できる。

5. 結 言

組織不均質性を考慮し、 α_c を一定(0%および80%)としたYGW18多層溶接金属のシャルピー吸収エネルギーに及ぼす入熱量、パス間温度の影響を調査し、以下の結論を得た。

- ・ 入熱量、パス間温度が一定のもので、多層溶接金属のシャルピー吸収エネルギー(vE_0)はばらつきを示す場合があるが、柱状組織分率 α_c が一定のもとは、入熱量の増加、パス間温度の上昇に伴って vE_0 が低下する明確な傾向が確認できた。従って、 α_c は組織不均質性の指標として有効であり、 vE_0 のばらつきが大きかったのは、ノッチ位置に含まれる原質部と再熱部の存在比率が変動していたことが一因と考えられる。
- ・ 800–500℃冷却時間と vE_0 の間には良好な相関が認められたこと

から、 $\Delta t_{8/5}$ を靱性に及ぼす入熱量、パス間温度に共通な、熱的条件の統一的な指標ととらえることが可能である。

謝 辞

本研究は川田工業株式会社と共同で実施されたものであり、技術研究所溶接研究室の津山忠久氏、藤田敏明氏、湯田誠氏に多大なる御協力を戴きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 建築研究所:鉄骨梁端溶接接合部の脆性的破断防止ガイドライン・同解説. 第1版. 東京, 日本建築センター, 2003, p.39
- 2) 向井昭義 ほか:鋼構造論文集. 7(26), 13(2000)
- 3) 原山浩一 ほか:日本建築学会大会学術講演梗概集(東北). 2000, p.589
- 4) 岡沢岳 ほか:鋼構造論文集. 8(31), 1(2001)
- 5) 倉持貢 ほか:鋼構造年次論文集. 11, 665(2003)
- 6) 児島明彦 ほか:新日鉄技報. (380), 33(2004)
- 7) 湯田誠 ほか:鉄構技術. 15(168), 28(2002.5)
- 8) 津山忠久 ほか:鉄構技術. 17(196), 21(2004.9)
- 9) 津山忠久 ほか:鉄構技術. 18(212), 28(2006.1)
- 10) 中込忠男 ほか:日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道). 2004, p.533
- 11) 西田祐三 ほか:溶接学会全国大会講演概要. 2004, p.316