



特集記事・2

我が国の社会インフラを支える鉄鋼材料

建築構造用高性能590N/mm²級 TMCP鋼材の超高層建築物への適用

Application of High Performance 590 N/mm² Class Thermo-mechanical Control Process (TMCP) Steel Plate for High-Rise Building

廣田 実
Minoru Hirota

JFEスチール(株)
建材センター建材開発部
主任部員(副部長)

1 はじめに

地震が多発する我が国では、建築構造物に高い耐震性能が求められ、構造物を構成する各々の鉄骨部材には、大規模地震時に地震エネルギーを吸収することが要求されている。鋼材製造技術の進歩により、これらの要求性能に答え、優れた耐震性能を備えた鋼材が開発されている。

一方、近年の建築物の超高層化や、大スパン化の設計要求に対応し、建築構造物用の高強度鋼材が開発されている。一般建築で多用される490N/mm²級鋼を超えた、熱処理型の建築構造用590N/mm²級鋼材(SA440鋼材¹⁾)が開発され、多くの超高層建築物を中心に採用されている。このSA440鋼材では、多量の合金添加とともに、図1(a)に示すような2相域焼入を含む多段熱処理により製造されており、製造工期の長期化を、多量の合金添加は溶接性の低下をもたらし、適用拡大を妨げる要因となっていた。

JFEスチールでは、非調質で材質を造り込むためのTMCP(Thermo-mechanical control process: 加工熱処理)技術を駆使することにより、図1(b)のような2相域熱処理を省略したプロセスでSA440鋼材と同等の機械的特性を確保し、さ

らに、独自の溶接熱影響部高靱化技術との組み合わせにより、優れた溶接施工性と超大入熱溶接部靱性も兼ね備えた、建築構造用高性能590N/mm²級TMCP鋼材「HBL[®]440²⁾」を開発した。以下では、建築耐震構造用鋼材として必要とされる各種特性と、超大入熱溶接部靱性を同時に達成するための基本指針、開発鋼の基本性能、および超高層建築物への適用に向けて実施した溶接施工実験の結果について紹介する。

2 開発鋼の材質制御指針

2.1 建築耐震構造用鋼材に必要な性能

建築構造物の構造設計において、1981年の新耐震設計法³⁾の導入により、従来の弾性設計に対し塑性設計の考え方が加わった。建築構造物の塑性変形性能を向上させるため、建築耐震構造用鋼材には、降伏点のばらつき低減化(狭レンジ化: 120N/mm²以内)、低降伏比化(YR: 80%以下(降伏点の引張強さに対する比))、が要求される。また、溶接部の脆性的破断を防止するため、鋼材の衝撃特性の確保と溶接性に影響する化学成分の規制、が要求される。これらの鋼材性能を網羅した鋼材がSN鋼材(JIS G3136建築構造用圧延鋼材)として、1994年JIS規格化、1995年各鋼材メーカーが認証を取得した。

高強度鋼材である建築構造用590N/mm²級鋼(SA440鋼材)に関しても、地震時における塑性変形性能が期待されることから、同様に、降伏点の狭レンジ(100N/mm²以内)、低降伏比(80%以下)および、衝撃特性、化学成分等のSN鋼材と同様の性能が規定されている。

2.2 低降伏比(低YR)確保のためのTMCP技術

高強度鋼において低YR特性を確保するための基本指針は、ミクロ組織を軟質相と硬質相からなる複相組織にするこ

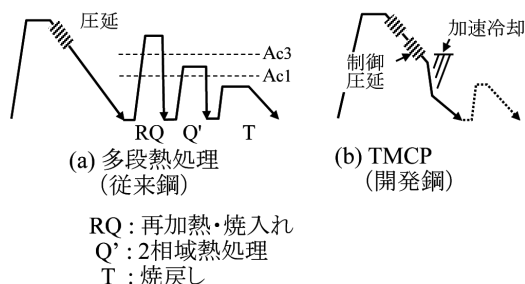


図1 低YR 590N/mm²級鋼材の製造プロセス

とである。590 N/mm²級鋼材では、軟質相と硬質相の組合せとして、フェライト+ベイナイト、フェライト+焼戻しマルテンサイト、フェライト+ベイナイト+パーライト+MA (MA : Martensite-austenite constituent) などが用いられる。TMCPによってこのような複相組織を実現するには、化学成分、制御圧延条件、加速冷却条件を最適化する必要がある。

図2は、開発鋼のミクロ組織に及ぼす加速冷却条件の影響を連続冷却変態線図 (CCT 線図) を用いて示した図である。模式図①に示す適正な加速冷却条件 (b) では、図3 (b) に示すようなフェライト+パーライト+ベイナイト+MAの複相組織が得られ、目標の機械的特性が得られる。条件 (a) のように冷却停止温度が高すぎると、図3 (a) のようにフェライトとパーライト主体の組織となって強度が不足し、条件 (c) のように冷却停止温度が低すぎると、図3 (c) のように高YRのベイナイト単相組織となる。このようなミクロ組織の複相化制御による高強度と低YR特性の両立は、図2模式図② (d) のように加速冷却を途中で中断してフェライトを析出させたり、(e) のような連続冷却中にフェライトを析出させる冷却速度制御によるフェライト+ベイナイトの複相組織化によっても実現できる。また、Mn、Cr、Mo、Nbなどの合金添加によりMAの生成量が増加することが知られており⁴⁾、これらの合金元素添加量の最適化も重要である。

開発鋼では、高精度の加速冷却を可能にする鋼板水冷装置 *Super-CR* と *Super-OLAC*^{®5)} を活用するとともに、Cr、Mo、V、Nbの添加量を最適化することにより、適正なミクロ組織と機械的性質を達成した。

2.3 超大入熱溶接熱影響部高靱化技術

超高層建築物の鉄骨柱として広く使用される溶接組立箱形断面柱の製作では、高効率化の観点から溶接施工において、エレクトロスラグ溶接 (ESW) や多電極サブマージアーク溶接 (SAW) など、入熱量が500 kJ/cmを超える超大入熱溶接が適用され、溶接熱影響部 (HAZ : Heat Affected Zone) の著しい脆化が問題となる。

これまでの大入熱HAZ靱性向上手法としては、(1) TiNや

酸化物など高温でも安定な微細粒子分散によるオーステナイト (γ) 細粒化、(2) 低Cまたは低Ceq化 (Nb低減も含む) による焼入性低下、(3) 微細分散粒子活用によるγ粒内フェライト生成促進など、比較的焼入性の低い成分設計でHAZ組織をフェライト主体とすることにより、MAを含む上部ベイナイトなど低靱性組織の生成を抑制することが基本であった⁶⁾。

一方、本開発鋼は、強度確保とオンライン製造での低降伏比化のためにMoなどの合金元素を添加し、従来より焼入性がやや高い成分設計としている。このため、溶接組立箱形断面柱用など大入熱溶接部靱性が特に要求される仕様に対応するには、大入熱HAZでの上部ベイナイトの生成を許容したうえで、上部ベイナイト中のMA生成を極力抑えることによる靱性改善を志向した。Si低減により大入熱HAZに生成するMAが減少することは従来から知られているが⁷⁾、Siと同時にPを低減することにより、さらにMA量は減少してHAZ靱性が向上する。図4は、入熱1,000 kJ/cmのESW溶接ボンド部近傍を模擬する熱サイクル (1,400℃加熱、800~500℃冷却時間1,000 s) を付与した再現HAZのミクロ組織写真である。従来成分のSA440ではMAが認められるのに対し、Siと

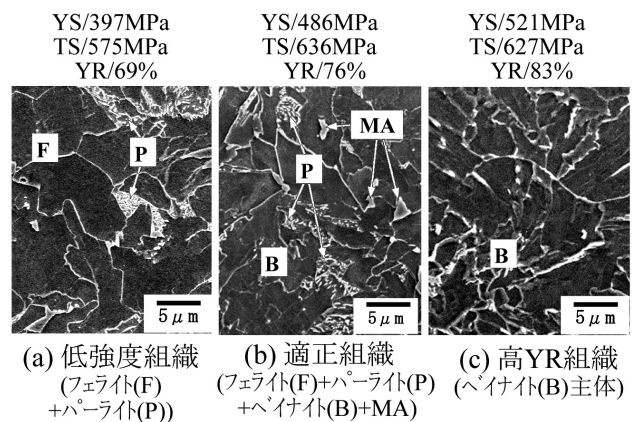


図3 ミクロ組織例 (走査型電子顕微鏡)

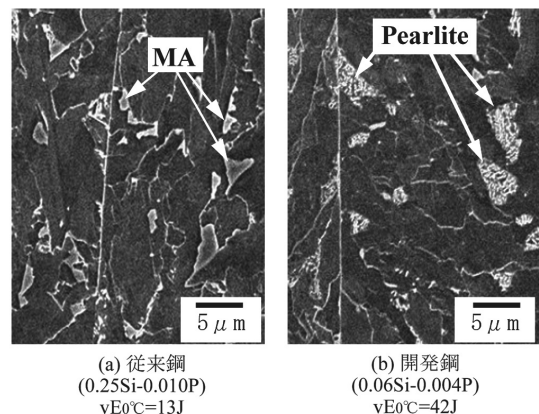


図4 ESW継手ボンド部相当の再現HAZ組織

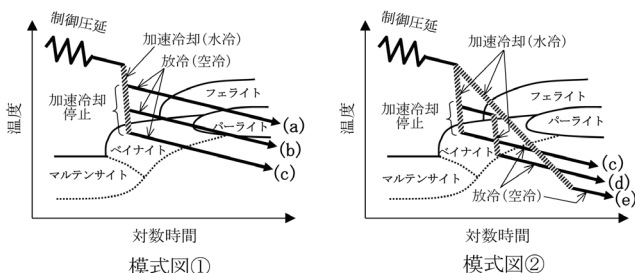


図2 ミクロ組織に及ぼす加速冷却条件の影響

Pを同時に低減した低Si—低P成分では、MAは顕著に減少してパーライト組織に変化した。それにもとない、開発鋼の再現HAZ靱性は上部ベイナイト主体のミクロ組織であるにもかかわらず改善された。

3 開発鋼の特性

3.1 母材特性・溶接性

表1に開発鋼の一般仕様鋼（板厚19～50mm）と大入熱仕様鋼（板厚60～100mm）の実機出鋼成分（製品分析値）を示す。C含有量を0.10%未満に低減して溶接低温割れ感受性を抑えたうえで、母材および大入熱HAZにおいて強度と靱性のバランスに優れたベイナイト主体のミクロ組織が得られるように、Cr、Mo、V、Tiなどの元素を添加した。板厚60 mm以上の大入熱仕様鋼は溶接組立箱形断面柱用途を想定し、大入熱

表1 開発鋼の化学成分

	板厚 (mm)	化学成分 (重量%)						Ceq ^{*1}	P _{CM} ^{*2}
		C	Si	Mn	P	S	others		
一般仕様 HBL440	19	0.06	0.21	1.47	0.008	0.002	Cr, Mo, Nb,V,Ti	0.42	0.17
	50	0.05	0.21	1.47	0.010	0.001		0.41	0.16
大入熱仕様 HBL440	60	0.09	0.06	1.50	0.005	0.002		0.45	0.20
	100	0.08	0.07	1.49	0.005	0.002		0.45	0.20
HBL440 規格	t≤40	≤	≤	≤	≤0.030 ^{*3}	≤	必要に応じて 添加できる	≤0.44	≤0.22
	40<t	0.12	0.55	1.60	≤0.020 ^{*4}	0.008		≤0.47	
SA440 規格	t≤40	≤	≤	≤	≤0.030 ^{*3}	≤	必要に応じて 添加できる	≤0.44	≤0.28
	40<t	0.18	0.55	1.60	≤0.020 ^{*4}	0.008		≤0.47	

*1 Ceq =C+Si/24+Mn/6+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14
*2 P_{CM} =C+Si/30+Mn/20+Cu/20+Ni/60+Cr/20+Mo/15+V/10+5B
*3 HBL440B(SA440B), *4 HBL440C(SA440C)

表2 開発鋼の機械的特性

	板厚 (mm)	試験片	引張特性				衝撃特性	
			YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	YR (%)	EL (%)	vE0℃ (J)	vTrs (℃)
一般仕様 HBL440	19	JIS 1A	490	619	79	18	358	-95
	50	JIS 4	484	612	79	31	380	-105
大入熱仕様 HBL440	60		482	631	76	29	347	-50
	100		471	603	78	28	340	-80
HBL440 規格	19≤t≤32	JIS 1A	440 ～540	590 ～740	≤80	≥15	≥70	—
	32<t≤40					≥16		
	40<t≤100					≥20		

YS:降伏点又は耐力 TS:引張強さ YR:降伏比 EL:伸び
vE0℃:シャルピー吸収エネルギー(0℃) vTrs:破面遷移温度

表3 y形溶接割れ試験結果

板厚 (mm)	溶接 方法	試験条件		割れ率(%)		
		溶接材料 溶接条件	予熱 温度	表面 割れ	断面 割れ	ルート 割れ
100	GMAW (CO ₂)	JIS Z3312 G 59J A 1 U C 3M1T (MG-60, φ1.2) 250A-30V-26cm/min (17kJ/cm) 雰囲気:5℃,60%	無し (5℃)	0	0	0
				0	0	0

HAZ靱性を考慮した前述の低Si—低P系成分とした。

表2には鋼板母材の引張特性およびシャルピー衝撃特性を示す。いずれも目標 (HBL[®]440規格) を満足している。シャルピー破面遷移温度 (vTrs) は-50℃未満であり、優れた母材靱性を示した。

表3には板厚100 mmのy形溶接割れ試験結果を示す。CO₂溶接 (GMAW) による予熱なし (5℃) の試験で割れは発生しなかった。従来のSA440規格 (P_{CM}≤0.28) に対して、開発鋼ではP_{CM}≤0.22 (HBL[®]440規格) であり大幅に溶接性が向上している²⁾。

3.2 溶接継手特性

一般仕様鋼を用い、GMAW溶接、多層SAW溶接、ESW溶接による溶接継手を製作し、シャルピー衝撃試験を行った。表4に溶接条件、継手概要およびシャルピー試験片の採取位置を、図5にシャルピー試験結果を示す。入熱60kJ/cm未満のGMAWおよびSAW継手では、100J以上の優れた靱性を示した。入熱600kJ/cm超えの大入熱ESW継手においても平均47J以上を確保した⁸⁾。

表4 溶接条件、継手概要、シャルピー試験片採取位置

溶接方法	GMAW (CO ₂)	SAW (2電極)	ESW
溶接材料	JIS Z 3312 G59JA1UC3M1T, φ1.2	JIS Z 3351 YS-NM1, φ4.8 JIS Z 3352 SACG1	JIS Z 3351 YS-NM1, φ1.6 JIS Z 3353 FS-FG3
入熱量 パス間温度	17 ~ 30 kJ/cm 70 ~ 90 ℃	46 ~ 53 kJ/cm 54 ~ 186 ℃	617 kJ/cm —
開先形状 積層方法			
シャルピー 試験片 採取位置			

WM:溶接金属 HAZ:溶接熱影響部 FL:溶融境界線(Fusion line)

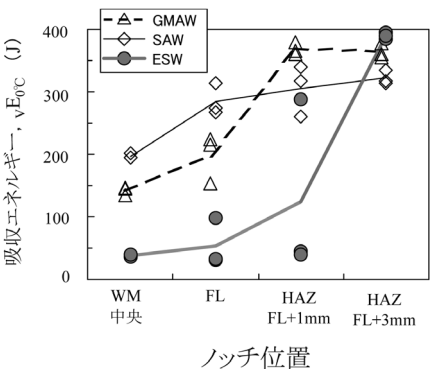
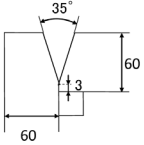


図5 溶接継手シャルピー試験結果

4 超高層建築物適用に向けた溶接施工実験結果

超高層建築物向け溶接組立箱形断面柱では、柱フランジ、ウェブ（スキンプレート）が厚肉傾向にあり、鉄骨生産性の観点から板厚60mm程度までの柱角継手に1パスSAW溶接が用いられている。至近では板厚70mmにおける1パスSAW溶接や、板厚70mmのうち初層部60mm程度までを1パスSAW溶接で施工した後、表層部をGMAW溶接で施工する混合溶接方法等の高能率溶接施工に関する研究事例もある^{9,10}。板厚60mmの大入熱仕様鋼を用いた1パスSAW溶接による溶接継手を製作し、シャルピー衝撃試験を行った¹¹。表5に溶接条件、継手概要を、図6にシャルピー試験片の採取位置

表5 大入熱仕様鋼を用いた溶接条件、継手概要（SAW溶接）

溶接方法	板厚(mm)	予熱	開先形状	溶接材料	入熱量(kJ/cm)
				溶接条件	
SAW (2電極)	60	なし (17℃)		先行ワイヤ: KW-101B 後行ワイヤ: KW-101B (JIS Z3351 YS-NM1) フラックス: KB-551 (JIS Z3352 SAC11) 先行: 2300A-38V 後行: 1800A-52V 19cm/min	572

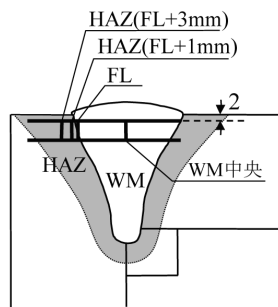


図6 溶接継手シャルピー試験片採取位置（SAW溶接）



図7 マクロ試験結果（SAW溶接）

を示す。図7にマクロ試験結果、図8にシャルピー試験結果を示す。靱性が低下しやすいボンド部およびその近傍のノッチ位置でも、平均200J以上の非常に優れたシャルピー特性を示した。

一方、大ホール等の大空間を構築するためのメガフレーム（大トラス）では、溶接組立箱形断面柱にとどまらず水平材の梁材においても厚肉傾向にあり、柱に内蔵される内ダイアフラムも板厚70mmを超える極厚材が使用されつつある。一般に内ダイアフラムとスキンプレートとのESW溶接は、溶接入熱が過大になることから、内ダイアフラム板厚65mm程度を限界としてきた。大入熱仕様鋼を用い、溶接入熱1,000kJ/cm超の大入熱ESW溶接部の靱性を確認するため、板厚90mmのスキンプレート、板厚75mmの内ダイアフラム、板厚70mmの梁フランジによる溶接継手を製作した¹²。図9に開先形状、表6に溶接条件を示す。ESW継手は1,200kJ/cmの超大入熱溶接で施工されている。図10にマクロ試験結果、図11にシャルピー試験片の採取位置を示す。試験片の採取方向は内ダイアフラム板厚中心が試験片の軸と一致する方向（A方向）と、スキンプレートの内側から板厚方向に6mm入った線とFL（溶融境界線（Fusion line））の線とが交わる点を基準にして、FLの線と直交する方向（B方向）の2方向とした。図12にシャルピー試験結果を示す。個々の値で一部低値を示したが、平均100J以上の非常に優れたシャルピー特性を示した。

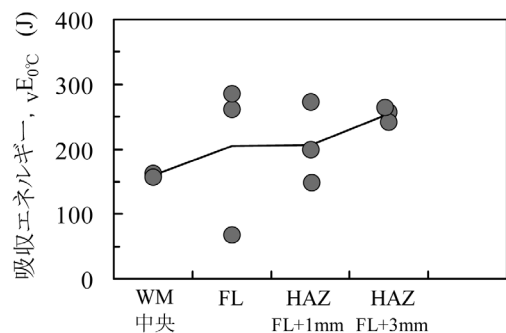


図8 溶接継手シャルピー試験結果（大入熱仕様鋼、SAW溶接）

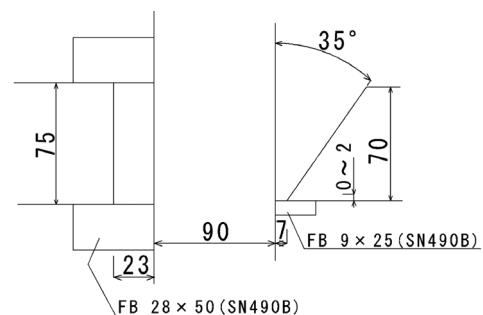


図9 開先形状（ESW溶接、GMAW溶接）

表6 大入熱仕様鋼を用いた溶接条件 (ESW溶接、GMAW溶接)

溶接方法	規格	溶接材料	溶接入熱 (kJ/cm)
		溶接条件	
ESW	JIS Z3353 YES602-S/ FES-CS 該当	ワイヤ: KW-60AD (1.6φ) JIS Z3353 YES602-S フラックス: KF-100AD (20×D) JIS Z3353 FES-CS	1,198
		380A-52V 0.99cm/min	
GMAW (CO ₂)	JIS Z3312 G59JA1UC3M1T	ワイヤ: YM60C (1.2φ)	8~24 10~34
		横方向 300A-35V 27~78cm/min 下方向 270~330A-30~37V 19~67cm/min (パス間温度250℃以下)	

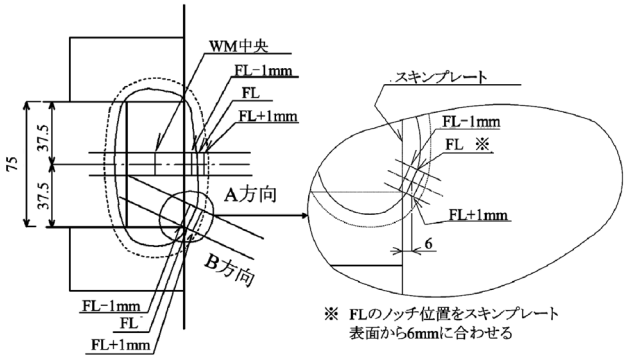


図11 溶接継手シャルピー試験片採取位置 (ESW溶接)

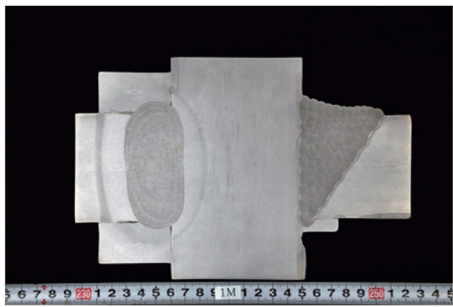


図10 マクロ試験結果 (ESW溶接、GMAW溶接)

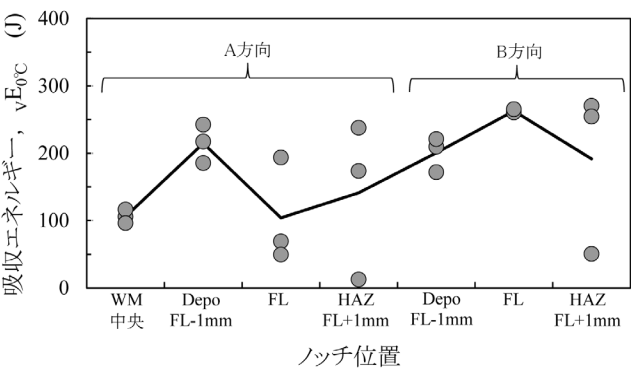


図12 溶接継手シャルピー試験結果 (大入熱仕様鋼、ESW溶接)

5 おわりに

本稿では、TMCP技術を駆使することにより、従来の建築構造用590N/mm²級鋼材 (SA440鋼材) に必須であった2相域熱処理を省略し、同等の機械的性質と優れた溶接性を実現した建築構造用高性能590N/mm²級TMCP鋼材「HBL®440」について紹介した。また、超高層建築物への適用を想定し、厚肉材を用いた溶接組立箱形断面柱の溶接施工実験により、良好な超大入熱HAZ靱性が得られることを示した。これらの結果を基に、首都圏を中心に超高層建築物への本開発鋼の適用が進み出している。

参考文献

- 1) 建築構造用高性能590N/mm²鋼材 (SA440) 設計・溶接施工指針 第3版, 日本鉄鋼連盟, (2016)
- 2) 大森章夫, 中川佳, 室田康宏: JFE技報, (2014) 33, 25.
- 3) 改正建築基準法施行令新耐震基準に基づく構造計算指針・同解説, 日本建築センター, (1981)
- 4) 平井征夫: 溶接学会誌, 50 (1981) 1, 37.
- 5) 遠藤茂, 中田直樹: JFE技報, (2014) 33, 1.

- 6) 木村達己, 角博幸, 木谷靖: JFE技報, (2004) 5, 38.
- 7) 伊藤慶典, 邦武立郎, 池田允彦, 大谷泰夫, 小溝裕一: 住友金属, 29 (1977) 4, 13.
- 8) 植木卓也, 中川郷司, 中川佳, 石井匠, 大森章夫, 加村久哉: 日本建築学会大会学術講演梗概集, (2012), 1249.
- 9) 横山幸夫, 吉村鉄也, 小林光博, 宋勇勲, 波川智明, 石井匠, 藤沢清二, 森田耕次: 日本建築学会大会学術講演梗概集, (2014), 1037.
- 10) 宋勇勲, 波川智明, 一宮清孝, 藤沢清二, 石井匠, 早川直哉, 廣田実, 森田耕次: 日本建築学会大会学術講演梗概集, (2015), 1031.
- 11) 廣田実, 藤沢清二, 中川佳, 村上行夫, 大森章夫, 赤塚隆男: 日本建築学会大会学術講演梗概集, (2014), 1033.
- 12) 廣田実, 藤沢清二, 山田浩二, 上野裕人: 日本建築学会大会学術講演梗概集, (2016), 1203.

(2016年9月9日受付)