

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23360240

研究課題名(和文)変形とリダンダンシーを考慮した鋼構造耐火設計の枠組構築

研究課題名(英文)Study on Fire Resistance Design of Steel Frames taking Deformation and Redundancy into account

研究代表者

鈴木 弘之 (Suzuki, Hiroyuki)

筑波大学・名誉教授

研究者番号：20114093

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,300,000円

研究成果の概要(和文)：鋼構造耐火設計における架構・壁の変形と崩壊温度のばらつきの問題を研究した。石膏ボード乾式壁の火災時における変形追従性能は架構の変形に対して不足することを実験によって明らかにした。この知見を踏まえ、火災が層内で拡大したとしても、健全なキーエレメントが僅かでも残存すれば、架構の崩壊温度は非延焼火災の場合のそれと変わらないことを明らかにした。鋼の高温強度がばらつくことによる架構の崩壊温度のばらつきは、600 を超える高温域でむしろ増え、そのことは複数の崩壊モードが競合するときも変わらないという知見と、そうであることの要因を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Studies have been made on deformation of dry walls as well as variations of ultimate states of steel frames subjected to fire. First, it is found by experiment that gypsum board walls cannot follow large downward displacements of heated beams. However, although fire spreads to a larger space within the floor for the weakness of walls, the overall ultimate temperature is found to be hardly deteriorated with a few remaining stable key elements. Second, it is found analytically that variations of ultimate temperatures of steel frames in fire due to varied high temperature strengths of materials increases at rather higher temperatures greater than 600 degree Celsius. These tendencies remain unchanged when plural collapse modes compete stochastically with each other. Theoretical factors influencing the above results have also been clarified.

研究分野：建築構造 耐火構造

キーワード：架構の崩壊温度 応力再配分 リダンダンシー 柱と梁の変形 地震後火災 火災応答解析 間仕切り
壁の変形 強度諸元のばらつき

1. 研究開始当初の背景

終局強度型の鋼構造耐火設計が浸透し始めて 10 年以上経過したが、この型の設計法の信頼性向上に向けて 2 つ問題点が挙がる。火災時における変形の問題と諸元のばらつきの問題である。骨組自体の火災時変形性状はほぼ把握できるようになっているが、架構構面内に嵌め込まれた非耐力壁の変形追従性能は、国の内外を見渡しても、ほとんど知られていないという実情があった。一方、規格値のあるわけではない鋼の高温強度のばらつきを耐火設計の枠組の中でどう位置づけてゆくかは極めて重要である。大きなばらつきを持つ火災性状に比べて鋼架構の崩壊温度のばらつきは小さいのではないかと信じられている一方で、過度な安全係数を崩壊温度に乗じているのが現状の実用耐火設計である。

2. 研究の目的

鋼架構の火災時リダンダンシー、諸要素の変形、強度諸元のばらつきを踏まえた耐火設計の枠組の構築に向けて、次の各項を目的とする研究を行った。(1) 架構構面内に嵌め込まれた石膏ボード壁を対象として、火災時の梁の下方たわみに対する当該壁の変形追従性能を加熱と加力を同時負荷する実大実験によって明らかにし、併せて性能向上をも試みる。(2) 壁の変形追従性能と火災時リダンダンシーを踏まえた鋼架構の崩壊温度を明らかにする。(3) 温度上昇に伴う鋼の強度の推移・分布・ばらつきを真正に捉えた鋼架構の崩壊温度の期待値と標準偏差を明らかにする。

3. 研究の方法

上記目的の(1)に対しては実大モデルの載荷加熱試験を計画し、実施した。壁試験体と加熱・加力試験装置は本予算で作成した。目的(2)に対しては既開発の数値計算法である火災応答解析による研究を行った。目的(3)を達成するためには、従来よりも高い温度下の鋼の強度情報と溶接接合部の高温強度情報が必要であることが判明したため、鋼の高温素材試験を行った。崩壊温度のばらつきを分析すべく、統計理論とモンテカルロ法による数値計算両面からの研究を行った。

4. 研究成果

(1) 乾式間仕切り壁の変形追従性能

鋼構造架構構面内にぴったりはめこまれた石膏ボード製の壁が、火災時に垂れ下がってくる梁の変形に耐火性を失うことなく追従出来るかを、つまり図 1 のような状況にある壁の耐火性能を、壁に強制変形と加熱を同時に加える実大実験によって調べた。試験体は 3m x 3m の軽量鉄骨下地 + 両面強化石膏ボード 2 面縦張り形式の乾式間仕切り壁 6 体 S1 ~ S6 である。S1 ~ S5 は 1 枚張り、かつ常用のコ形断面スタッドで構成される。S6 は 2

枚張りとし、さらにこれのスタッドには切り欠きを設けて壁の全体座屈抑制を企図した。S1、2 に対しては加熱のみを負荷して壁周辺の拘束がもたらす熱応力の発達を調べた。S3 ~ 6 に対してはさらに鉛直方向強制変形を同時作用させて壁の変形追従性能を求めた。S4,5,6 に対しては均等圧縮、S3 に対しては偏心圧縮とし、S5,6 に対する圧縮開始はスタッド温度が 300°C に達したときとした。図 2 は S5 の試験時熱映像である。強制変形に伴いスタッドが座屈し、目地に隙間や亀裂が生じて、壁の耐火性能が失われたことが分かる。

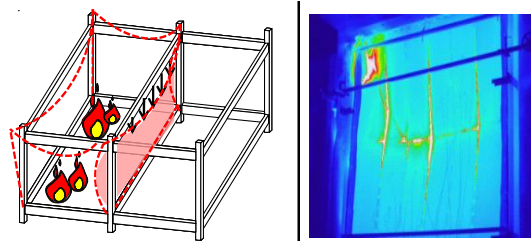


図 1(左段) 火災時における架構と壁の変形、図 2(右段) 壁 S5 の座屈による面外変形

図 3 は各試験体の鉛直荷重 ~ 鉛直変形、図 4 は鉛直荷重 ~ 面外変形の関係である。外力を受けず熱応力のみを受ける S1,2 の最大強度は、S3,4 に作用する熱応力の大きさをも表している。したがって、前者と後者の強度差は石膏ボードの強度と考えられ、実際、S3 と S2 の強度差は S6 の強度に概ね対応する。加熱と載荷が同時負荷される S3,4 のスタッドは低い温度で座屈し、その後の壁の耐力劣化は極めて激しい。載荷を加熱より遅らせた S5 と 6 は、火災時梁の下方たわみが大きくなるのは梁が高温化した後であることを模擬しており、スタッドは当然ながらより高温になった後に座屈する。このことに対応して、S5 では、圧縮耐力 (スタッドの座屈耐力) は比較的小さく、座屈後の耐力劣化も緩やかとなり、30mm ほどの縮みと 250mm を超える面外変位にまで耐える。ただし、縮みが 10mm を超えると石膏ボードの亀裂や目地の開きが顕在化する。2 枚張りならば、より良好な性能が得られる。実用される石膏ボード壁の終局的な火災時変形追従性能は、ほぼ、S5 のそれで代表できると考えられる。スタッドを加工した S6 では、耐力劣化も面外変形の成長も S5 より緩慢になることが分かる。切り欠かれたスタッド要素の局部座屈が全体座屈に先行するために、これが壁の面外座屈の成長を抑制するからである。実際、S5・S6 の鉛直方向収縮量 12mm 時点の面外方向変形量を比べると、図 3、4 より、それぞれ約 178・90mm であり、S6 のこの時点における面外変形は S5 のその半分に止まる。この直後に S6 は防護装置に接触したため、その後のデータは参考値であるが、壁の基本仕様を変えないという制約下でも、耐火性能を改良出来るということは分かった。一方で、この仕様の枠内の改良に止まる限り、火災時に

おける梁の下方たわみに対する高さ 3m の石膏ボード壁の変形追従性能は、10cm を上回することは出来ないであろうことも分かった。

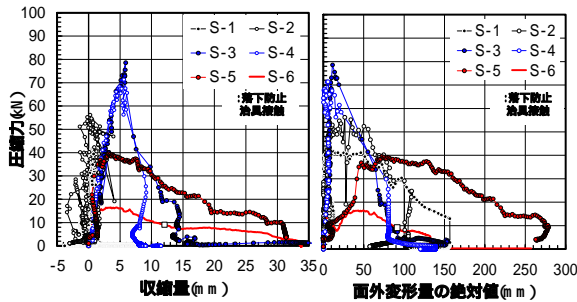


図3(左段)壁の圧縮力-鉛直変位関係、図4(右段)圧縮力-面外変位関係

(2) 層内延焼を被る鋼架構の崩壊温度

骨組構面に隙間なく組み込まれた乾式壁を、火災終局時に想定される梁の変形に完全に追従させることは、壁の根本的な仕様改良なしには難しい。スパンが 10m で丈が 60cm の梁が火災時に被るたわみは、Robertson 式によると、 $1000^2 / (800 \cdot 60) \approx 21\text{cm}$ となる。既往の実験や火災応答解析結果もこのオーダーの変形を示唆しており、成果(1)で得た壁の変形追従限界を大きく上回る。となると、架構の終局的耐火性能の実情は、壁が損傷して延焼が層内に拡大した後の架構の構造性能に支配されると考えなければならない。このことを踏まえた架構の崩壊温度解明研究を試みた。

耐震設計を施された 5 層 10 スパンの平面鋼架構の最下層が火災を被る場合を取り上げる。左端 1 スパンの下部が火災高温となる場合、左端 2 スパン下のそれ、・・・、左端 9 スパン下のそれ、及び最下層全体が火災の場合の架構の崩壊温度をそれぞれ火災応答解析によって求めて、延焼の影響を検討する。検討を深化させるべく、火災の前に架構が地震被災している場合をも取り上げる。最下層に永久層間変形角を被った架構の地震後火災をも考えるのである。地震後火災を同時考慮する理由を 2 つ挙げる。①地震後火災も壁の損傷を前提としなければならない同種の耐火問題であり、地震後の架構の耐火性に対する知見をも得ておきたい。②重要な 2 種の崩壊モードが存在し、地震後火災を同時考慮すると問題の本質をより顕在化させることができる。解析では、火災前の永久層間変位は右方に発生しているとする。この場合、延焼が左端スパンから広がる場合と、右端スパンからとでは結果が異なるので両方を考える。架構の階高とスパン幅はそれぞれ 4m、7.2m、総ての柱は同じ細長比と軸力比を持ち、それぞれ 0.33、0.3 とする。

解析結果を図 5 に示す。1 つの折れ線で繋げたプロット点は、同じ火災拡大と様々な永久層間変形角を受ける架構の崩壊温度の変化の様を表している。10 スパンの中 7 スパンまでの火災拡大の場合は、地震被災を受け

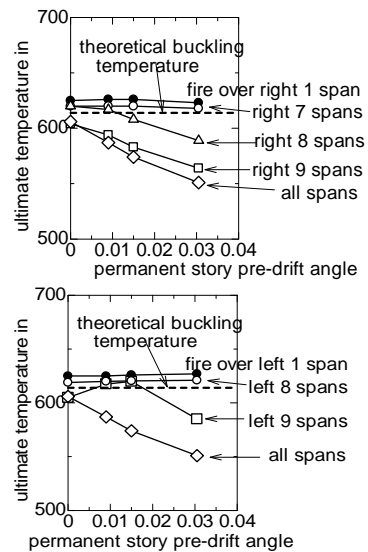


図 5 火災前に受けた地震による永久層間変位と架構の崩壊温度の関係(上段は火災が右端から拡大する場合、下段は左端からの場合)

たか否かによらず、崩壊温度はほぼ 625 で不変であることが分かる。1/50 を超える地震層間変形角を受けたとしてもそうであるのは、耐震設計された鋼造物の著しい構造特性の表れといえる。9 スパン以上の火災のときの崩壊温度は 625 を下回り、低下の程度は、地震被災の大きさと火災の拡大方向に依存する。崩壊温度が 625 である総てのケースで崩壊モードは図 6(a)に示す沈下型であり、それ以外のすべてのケースでは(b)図に示すスウェイ型であって、例外はない。水平な破線で示した温度 614 は柱の理論座屈温度である。これは、一定圧縮力と漸増温度を受ける柱の接線係数座屈温度である。一定圧縮力とは架構中の柱が受ける軸力比 0.3 に相当する常時圧縮力である。よって、この理論温度 614 は架構法や熱応力とは独立である。この理論値を終局耐火設計の目標値とすれば、崩壊温度 625 はこれを上回るから、架構の終局状態は、骨組の架構法、熱応力、被災が過大でなければ被災の状況の何れからも独立となる。被災とは火災前に受ける地震被災と延焼による拡大する火災の両方を指す。これをもたらすものは、既に明らかにされている架構の火災時リダンダンシーである。一方、スウェイモードが現出し、崩壊温度が低下するのは P-Δ 効果による。火災時に梁は伸び出して柱を傾けるから、地震被災なしでもスウェイモードは発生する(9 スパンと全スパン火災の場合)。梁の伸び出しが柱を地震被災の方向とは逆向きに傾けると、これが P-Δ 効果を弱めて、架構が沈下型崩壊-崩壊温度上昇に転ずることもある(左 9 スパン火災で永久層間変形角が 0.01 ほどの場合)。これより、架構の火災時リダンダンシーが P-Δ 効果に打ち勝つ耐火設計を講じておけば、火災の層内延焼による拡大や大きな地震被災の両方に備え得ることが分かる。層内のコアをコンクリート系の壁で区画する、キーエレメントに十分な耐火被覆を施す、

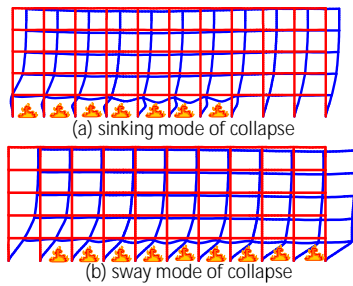


図6 拡大する火災を受ける架構の崩壊モード

などが講ずべき対策となる。

(3) 鋼材の高温強度と架構の崩壊温度のばらつき： 現在行われている架構の終局強度型の耐火設計を限界状態設計型の方法に高めて行くための基礎研究に取り組んだ。耐火性能上の最も基本的な強度要因である鋼材の高温降伏強度のばらつきに着目して、次の2系統の研究に取り組んだ。

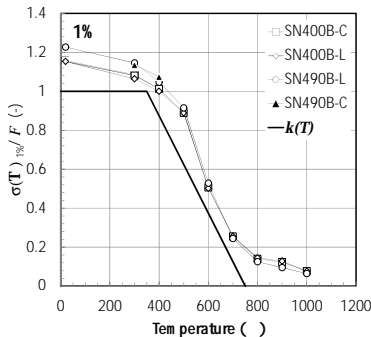


図7 1000 までの鋼材の高温時の歪1%時強度

① 素材の高温強度情報の補填： 崩壊温度が800°Cを超える架構が実用されることはなく、この温度を超える実用素材の強度もほとんど知られていない。しかし、中温域から高温域に亘って架構の崩壊温度のばらつきをシームレスに議論するためには、実用を超える高温域の素材強度のより正確な情報が必要であり、素材試験によってこれの補填を行った。図7は試験結果であり、SN400とSN490の2素材の1000°Cまでの歪1%強度が示されている。圧延L方向とそれに直交するC方向の強度を求めた。試験歪速度は0.3%毎分であり、図の強度は規格降伏強度で除して無次元化してある。400°Cを超えると強度低下の推移は、鋼種によらず、また強度の方向性もなく、ほぼ1本の曲線に収斂すること、700°Cを超えると当該曲線は上に凸に転じて緩やかな裾野状の曲線を描くこと、1000°Cに至って常温時強度の5%程が尚残存することなどが分かる。

補填しておくべきもう1つの重要な素材強度情報として溶接接合部の高温強度が挙がる。鋼構造耐火に即した当該情報は皆無に等しいことを踏まえて、次のA,B 2系列の高温素材試験を行った。SN490Bより成る鋼平板を完全溶け込み溶接で接合し、この溶接部が試験部の中央に来るように板を削り出し

て試験片とした。試験結果を図8に示す。縦軸は素材の歪1%強度を表す。この強度レベル以下の鋼材に常用されるJIS Z3312 YGW11を溶接材料とするA系列試験片を引っ張ると、約700°C未満のとき、母材部の降伏が先行し、母材部で破断する。軟鋼用のJIS Z3211 E4319を溶接材料とするB系列では、全温度域で溶接部が降伏・破断する。これに対応してB系列試験片の強度はA系列のそれを下回る。700°C以上の温度域では、A,B両系列の素材の強度はほぼ等しくなる。両溶接部と母材三者はほぼ同じ強度を持つことをこれは意味する。つまり、YGW11による溶接部の高温強度は、700°C未満のとき母材部のそれを上回るが、温度上昇と共に余裕が減って、これを上回る温度域では両者はほぼ等しくなることが分かる。

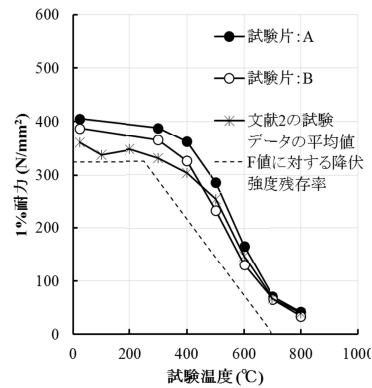


図8 溶接接合部金属の高温時の歪1%時強度

② 架構の崩壊温度のばらつき： 鋼材の高温降伏強度のばらつきの実情を把握するため、建築構造用鋼材の既往高温素材試験結果を分析し、試験温度間の高温降伏強度の相関係数行列を求めた。表1はSN490に対するそれである。常温時と高温時の強度間の相関は小さい一方で、400 以上の温度域では、各温度間で強い相関があることが分る。つまり、常温強度が高い鋼材が示す400 のときの強度は必ずしも高いわけではないが、400 のときの強度が高い鋼材が示す800 のときのそれは高いことが多いということである。この性質を組み込んだ高温降伏強度をサンプル生成して、モンテカルロ法(MC法)と理論解析の両面より、単純支持梁の崩壊温度のばら

表1 鋼(SN490B)の高温時降伏強度の相関係数行列

	20	100	200	300	400	500	600	700	800
20	1.00								
100	0.96	1.00							
200	0.74	0.83	1.00						
300	0.62	0.69	0.82	1.00					
400	0.56	0.66	0.86	0.98	1.00				
500	0.46	0.58	0.86	0.92	0.96	1.00			
600	0.39	0.54	0.79	0.87	0.93	0.95	1.00		
700	0.32	0.46	0.69	0.83	0.88	0.93	0.97	1.00	
800	0.11	0.25	0.58	0.78	0.83	0.89	0.92	0.94	1.00

つきを検討した。図9の横軸は梁の崩壊温度の平均値 T^{ave} 、縦軸はその標準偏差 T^{std} であり、理論解はMC法の解析結果にほぼ一致す

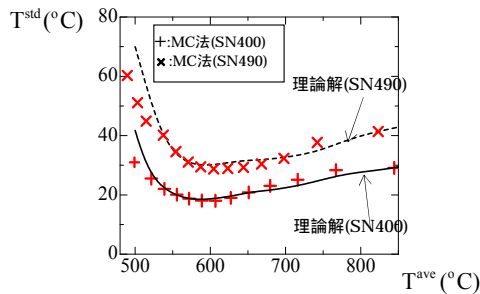


図9 一様な分布荷重を受ける梁の崩壊温度のばらつき

る。正相関を仮定した理論解が実情 (MC 法の解) をよく説明するのは、高温域では強度間の相関が強いからである。図に見るように、梁の崩壊温度が 600 を超えると、そのばらつきは温度上昇と共にむしろ漸増する。鋼材の強度が、温度上昇と共に、裾野を描くように緩やかに減少することがこうなること的主要原因である。

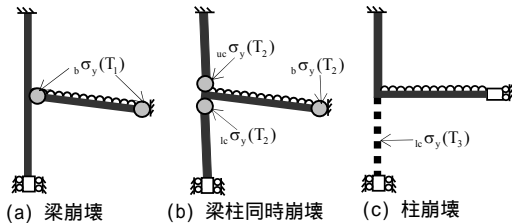


図10 平面ト型架構の火災時における崩壊モード

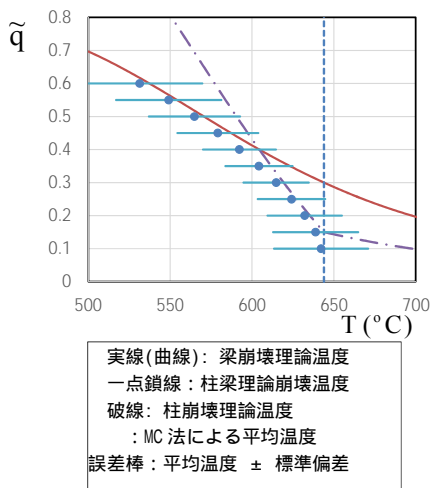


図11 平面ト型架構の崩壊温度のばらつき

次に、単純な架構である 2 層ト型架構の崩壊温度の期待値とばらつきを求めて、異なる崩壊モードの競合がこれらに及ぼす影響を調べる。SN490B を使用鋼材とする。図 10 の 2 層平面ト型架構の 3 部材が、上階延焼を仮定し、等しく昇温する場合を考える。柱軸力比 \bar{p} は 0.3 とする。図示の 3 種の崩壊モードが存在する。MC 法により各部材の高温降伏強度にばらつきを発生させ、各モードの崩壊温度を求めた。図 11 の縦軸は梁上荷重の無次元値 \bar{q} 、横軸は架構の崩壊温度およびその期待値と標準偏差である。図 11 の 3 本の線は各モードで決まる崩壊温度の理論確

定値であり、3 本の最内を包絡する線が架構の理論崩壊温度を表す。併記されている水平誤差棒は梁上荷重毎に得た架構崩壊温度のばらつきである。崩壊温度の期待値 (誤差棒の中央点) は、ほぼ理論線上に乗るが、3 理論線が交差する荷重付近でやや後者を下回る。3 理論線が交差する荷重付近では、常に弱いモードが選択され、この結果、崩壊温度の平均値が低下するからである。架構の崩壊温度の標準偏差は、図 9 が示す単材崩壊のときのそれとほぼ同じである。3 理論線が交差する荷重付近ではどの崩壊モードが出現するか、あるいは同時発生するかは確率的であるにも拘わらず上記の結果が得られる。しかし、より複雑な架構では、火災時リダンダンシーの大きさとそれによって決まる架構崩壊温度は崩壊モードに依存し、出現崩壊モードがばらつくことはリダンダンシーもばらつくことを意味して、上のようには様相は単純でない。現在、この問題の解明に取り組んでいる。

5. 主な発表論文等 〔雑誌論文〕(計 7 件)

- (1) Hiroyuki Suzuki: Ultimate Strength and its Application to Post-Earthquake Resistance of Steel Structures in Fire, 10-th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technologies, Oct., 2015 (採用決定)、査読あり
- (2) 尾崎文宣、長谷大志、河野守、森保宏、鈴木淳一: 鋼材高温強度にばらつきを有する場合の単純支持梁の崩壊温度 一火災時鋼架構の崩壊温度のばらつき評価 その 1—、日本建築学会構造系論文集、第 712 号、2015 年 6 月(採用決定)、査読あり
- (3) Fuminobu Ozaki: A Study on Clarification of a Relationship between Thermal Stress Attenuation and Strain Hardening of Steel for Steel Beams subjected to Fire, Proceedings of the Seventh International Symposium on Steel Structures/Korean Society of Steel Construction, CD-ROM pp.252-253, Nov. 2014, 査読あり
- (4) Fuminobu Ozaki: A Study on Clarification of a Relationship between Thermal Stress Attenuation and Strain Hardening of Steel for Steel Beams subjected to Fire, Proceedings of the 8th International Conference on Structures in Fire (SiF' 14), Vol.1 pp.81-88, June 2014, 査読あり
- (5) Fuminobu Ozaki: A Study on Clarification of a Relationship between Thermal Stress Attenuation and Strain Hardening of Steel for Steel Beams subjected to Fire, the 8th International Conference on Structures in Fire (SiF' 14)、2014.6、査読あり

- (6) Mamoru Kohno, Tomohito Okazaki:
Performance Based Fire Engineering in
Japan, International Journal of High-Rise
Buildings, Vol.2, No.1. pp23-30, 2013, 査読
あり

〔学会発表〕(計 29 件)

- (1) 水谷由香里, 尾崎文宣, 河野守, 森保宏:
鋼材の高温時強度のばらつきが鋼分解架
構の崩壊モードと崩壊温度に及ぼす影響,
日本建築学会大会, 2015 年 9 月 4 日~6
日、東海大学湘南キャンパス(神奈川県・
平塚市)
- (2) 宮坂 輝由, 河野 守, 岡崎 智仁, 鈴木 淳
二, 鈴木 弘之: 建築構造用鋼材溶接接合
部の高温引張試験, 日本建築学会大会,
2014 年 9 月 12 日~14 日、神戸大学(兵
庫県・神戸市)
- (3) 藤田航平, 平山貴至, 鈴木淳二, 大宮喜
文, 山本弘樹: 多様な加熱を被る石膏
ボード乾式間仕切り壁の温度上昇特性そ
の 1~5, 日本建築学会大会, 2014 年 9 月
12 日~14 日、神戸大学(兵庫県・神戸市)
- (4) 山本弘樹, 鈴木淳二, 柳橋拓, 大宮喜文,
鈴木弘之: 熱応力・強制変形を受ける乾
式間仕切壁の耐火性能 - 区画部材の拘束
条件が部材温度に与える影響, 日本建築
学会大会, 2013 年 8 月 30 日~9 月 1 日、
北海道大学(北海道・札幌市)
- (5) 鈴木弘之, 鈴木淳二, 山本弘樹, 大宮喜
文: 熱応力・強制変形を受ける乾式間仕
切り壁の変形追従性, 日本建築学会大会,
2012 年 9 月 12 日~14 日、名古屋大学(愛
知県・名古屋市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

鈴木 弘之 (SUZUKI HIROYUKI)

筑波大学・名誉教授

研究者番号: 20114093

(2)研究分担者

鈴木 淳一 (SUZUKI JUNICHI)

国土技術政策総合研究所・建築研究部・主
任研究官

研究者番号: 10453846

河野 守 (KOHNO MAMORU)

東京理科大学・工学部・教授

研究者番号: 60170205

尾崎 文宣 (OZAKI FUMINOBU)

名古屋大学・環境学研究科・准教授

研究者番号: 40434039