

平成 30 年 5 月 25 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2017

課題番号：26709040

研究課題名(和文) 鋼構造における溶接接合部の耐火性能解明と耐火設計法構築

研究課題名(英文) Clarification of Fire Resistance Performance and Construction of Fire Resistance Design for Welded Connections of Steel Structures

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 17,600,000円

研究成果の概要(和文)：本課題は建築鉄骨造の溶接接合部の耐火性能を解明することを主目的とする。溶接部を設けた鋼板試験体の高温引張実験、通しダイアフラム形式の柱梁溶接接合部の高温曲げせん断実験、母材、溶接金属、熱影響部に対する高温シャルピー衝撃試験、鋼架構の火災応答数値解析結果を用いた延性亀裂発生温度に基づく耐火設計法の提案を行った。各種実験より高温化した溶接接合部は母材部と同等もしくはそれ以上の高温耐力～変形能力を有することが確認され、また脆性破壊に対しては過度な安全側評価となってしまうが耐火実務設計で利用可能な溶接部の火災時延性亀裂に対する性能評価法を提案した。

研究成果の概要(英文)：The main purpose of this research is to clarify fire resistance performance on welded connections of steel building structures. High temperature tensile experiments for steel plates with the welded connections, high temperature bending shear experiments for column to beam welded connections, high temperature Charpy impact tests for the welded connection were conducted, respectively. Furthermore, verification methods on the brittle fractures of the welded connection in the steel structure subjected to fire was proposed. From the experimental results, it was confirmed that the welded connection at the high temperature possesses the same or larger strength and deformation capacity than the base steel member. The verification method on a ductile crack in the welded connection, which can be used at the fire resistance design in practice, was constructed.

研究分野：建築構造耐火

キーワード：鋼構造 耐火 溶接接合部 シャルピー衝撃値

### 1. 研究開始当初の背景

兵庫県南部地震では、鋼構造柱梁接合部の脆性破壊事例が多数報告され、その後、各種溶接接合部に関する研究が数多く実施された。一方で火災分野においては、鋼構造溶接部や柱梁接合部の耐火性能に関する研究は少なく、このため日本建築学会・鋼構造耐火設計指針において研究の必要性が述べられるに至っている。溶接部の耐火性能を検討する場合、先ずはその高温時性能の検討が必要である。既往研究では溶接接合部の高温耐力に着目した高温引張実験結果が僅かであるが示されており、600 以上の高温域においては、溶接接合部の高温耐力は母材のそれより低くなることが報告されている。しかしながらこれらは素材引張試験片に準じた実験結果であり、溶接接合部の部材としての研究は未だ行われていない。また上記指針は塑性変形能力を十分に期待した設計法となっているので、溶接接合部の火災時変形能力に関する検討も必要となる。特に溶接接合部の場合には、火災温度上昇時における脆性破壊の検討が重要となる。直近の海外での耐火実験において、柱梁溶接部が 400 の中温度域で脆性破壊したことが報告されたが、上記実験の試験体は我が国の溶接接合部ディテールとはかなり異なるものである。我が国の鋼構造では溶接接合が多用されており、また耐震設計が施されるために幅厚比制限された厚肉部材が使用されることから、地震時と同様に、火災時においても溶接接合部の耐火性能と火災時脆性破壊の検討は重要となる。

### 2. 研究の目的

本研究では、今まで殆ど調査・研究されてこなかった溶接接合部の火災時耐火性能を明らかにするため、(1)溶接接合部を含む鋼部材の高温引張実験、(2)柱梁溶接接合部の高温曲げせん断実験、(3)高温時における溶接接合部各部位のシャルピー衝撃試験、(4)有限要素法の数値解析を用いた鋼架構内の溶接接合部に対する耐火性能評価法の提案を行う。(1)においては引張部材としての溶接接合部の耐火性能の基本性能の把握、(2)は柱梁溶接部材としての高温曲げ耐力の検討、(3)は火災時の脆性破壊の可能性を検討するための基礎資料となるシャルピー衝撃値の検討、(4)は溶接接合部の脆性破壊に対する耐火性能評価法の提案が主な研究内容となる。

### 3. 研究の方法

上記(1)に対しては、完全溶け込みおよび部分溶け込み溶接継手の高温引張試験を行うことで、溶接接合部の耐火性能と高温時破断箇

所(溶接金属、熱影響部、母材)を検討する。(2)に対しては、通しダイアフラム形式の柱梁溶接接合部の高温曲げ実験を実施し、その耐火性能を評価する。(3)に対しては、溶接接合部の各部位(母材部、溶接金属部、熱影響部)に対して高温時シャルピー衝撃試験を実施することで、それらのシャルピー衝撃値のデータ取得・評価を行う。(4)に対しては、常温時の延性亀裂に関する一連の研究成果を踏まえ、これを火災高温時に拡張し、併せて火災応答数値解析を用いることで火災時の柱梁接合部に対する脆性破壊評価手法を提案する。

### 4. 研究成果

上記(1)～(4)の研究成果を述べる。図番号に関しては(1)～(4)の各セクションにおいてそれぞれ独立させて、番号1よりつけている。

#### (1) 溶接接合部を含む鋼板の高温引張実験

母材には SN490B 鋼板(ミルシート値 YP 364 N/mm<sup>2</sup>, TS 514 N/mm<sup>2</sup>)、溶接材料には YGW11 を用いた。図 1~3 に試験体の詳細を示す。各試験体には、実際の鉄骨骨組の梁フランジに発生する応力勾配を再現することを目的とした直線状のテーパを設け、これにより、試験体中央に位置する溶接部が最大応力断面になるようにした。テーパを設けた区画の試験体板厚は 12mm に統一し、特に完全溶け込み溶接部では、溶接部もしくはテーパ一部で破断させるために、板厚 16mm の板に

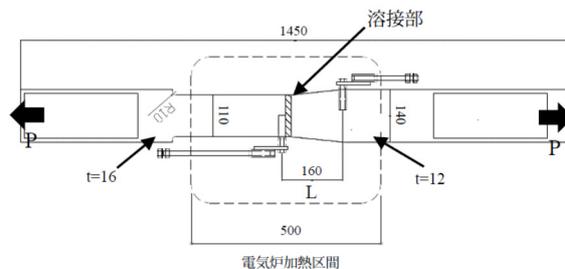


図1 試験体図(FW試験体)

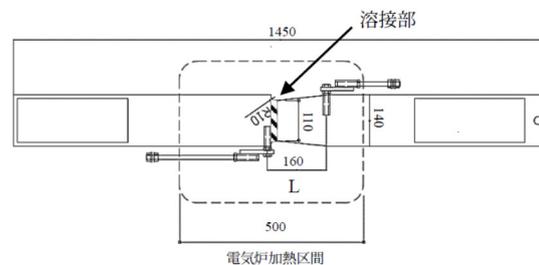


図2 試験体図(PW試験体、P試験体)

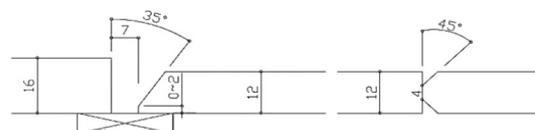


図3 溶接部詳細(左:完全溶け込み溶接、右:部分溶け込み溶接)

対して溶接を行った(図3)。半自動アーク溶接で完全溶け込み溶接(以下FW、図1)と部分溶け込み溶接(以下PW、図2)の試験体を製作した。FWの溶接部積層数は3、PWのそれは、表裏各1層とし、PW試験体に対しては、溶接後グラインダー仕上げを施して余盛部を削除した。超音波探傷試験を実施し、溶接部内部に欠陥がないことを確認している。溶接試験体の他に、溶接無し(以下P)の試験体も用意した。その試験体形状はPWのものと同じとした。試験温度はRT、400、600、700、800とし、PW試験体は試験体数の関係上



図4 加熱後の試験体写真(左上:FW[RT]、右上:FW[600°C]、左下PW[800°C]、右下:FW[800°C])

400の実験は実施しなかった。試験体の温度が一定になった後に载荷を開始した。各温度の試験体数は1体である。

実験結果は以下の通りである。P試験体はすべてテーパ最小断面部で破断した。PW試験体についても、すべてテーパ最小部の溶接金属で破断した。一方、FW試験体はRT~700では図1の溶接部より右側の母材部で破断し、800では、溶接溶け込み部と熱影響部の境界(フュージョンライン、以下FL)に沿って破断した。図4に試験後の試験体写真をそれぞれ示す。図6,7に各温度の荷重変形関係を示す。図に見るように試験温度が上昇するにつれて、最大耐力は低下し、また、最大変形は増加する。PW試験体は、部分溶け込み部に変形が集中するので、全体の変形量が小さいことがわかる。PW試験体では溶け込み部の断面積が母材断面積の2/3となる為に、常温時の最大荷重はP、FW試験体と比較して小さくなる。FW試験体では、常温時は溶接部より右側の母材部で破断したため、その最大



図5 FW[800°C]の溶接部破断写真

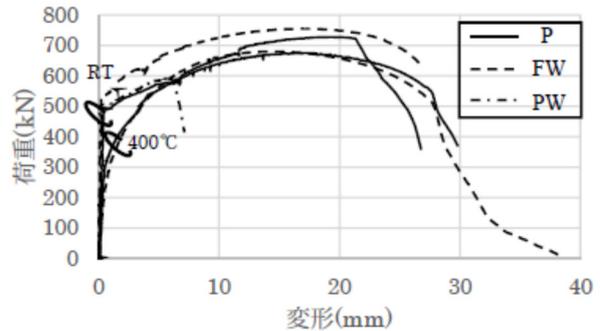


図6 荷重変形関係(RT、400°C)

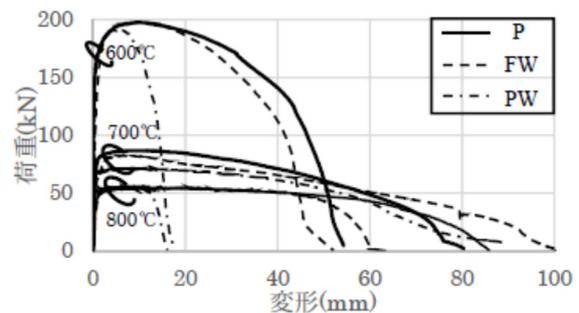


図7 荷重変形関係(600°C、700°C、800°C)

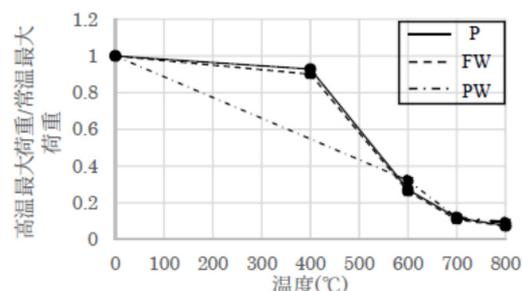


図8 常温荷重基準化

耐力はP試験体より大きくなった。一方、400以上のPW試験体ではP、FW試験体とほぼ同等の最大耐力となっており、本試験においては、溶接金属の高温強度は母材(SN490)のそれと比べて、大きかったものと考えられる。800のFW試験体はFLに沿って破断したものの、その耐力と変形能力はP試験体とほぼ同等であった。図8は高温時最大荷重を常温の最大荷重で基準化したものである。これから、溶接継手の有無、その種類に拘わらず強度低下率はほぼ同じであることがわかる。

以上より、溶接継手の高温引張試験を実施することで、溶接接合部の高温耐力-変形能力

を検討した。完全溶け込み溶接の場合には800の試験温度において、溶接FLに沿って破断するケースも見られたが、その高温耐力は母材同等であることを確認した。また、部分溶け込み溶接の場合には、溶接金属で破断したが、この場合の高温強度残存率は母材のそれとほぼ同等以上であることが確認された。

## (2) 柱梁溶接接合部の高温曲げせん断実験

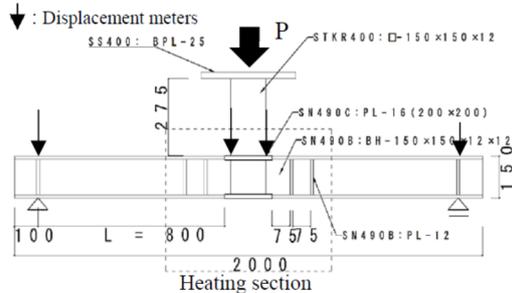


Fig.1 Test specimen

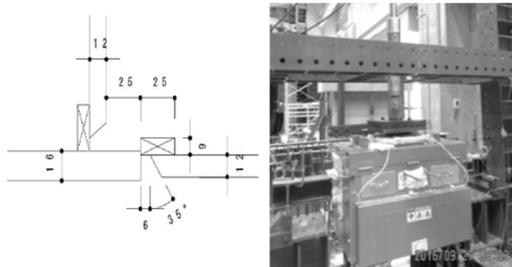
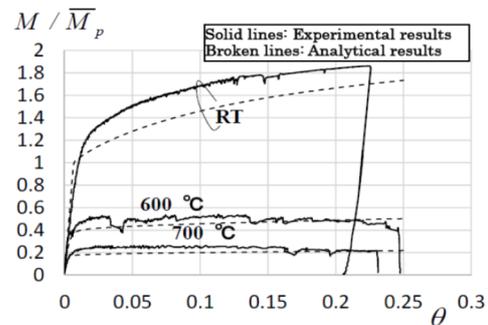


Fig.2 Left: Welded joint detail (Non-scallop)  
right: overview of experimental device

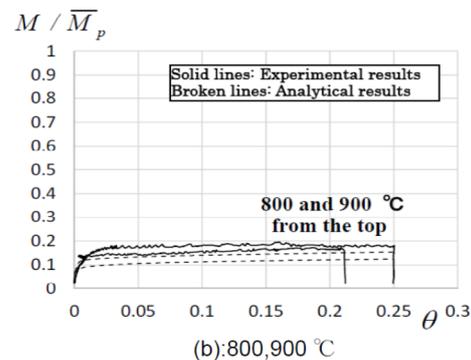
図1、2に柱梁接合部試験体と下フランジ部の溶接詳細図、荷重・加熱装置の外観写真を示す。柱、梁、ダイアフラムの鋼材は、それぞれSTKR400(-150×150×12)、SN490B(BH-150×150×12×12)、SN490C(PL-200×200×16)である。試験体中央部の柱上端より荷重Pを与えた。梁と柱はノンスカップ工法の通しダイアフラム形式で接合した(図2)。梁フランジと通しダイアフラム間はYGW-11のガスシールドアーク溶接とし、入熱温度およびパス間温度をそれぞれ管理した上で施工した。梁フランジとダイアフラムの溶接積層数は5で、引張側となる梁下フランジ溶接部に超音波探査試験を実施し、溶接欠陥がないことを確認した。実験パラメータは試験温度とし、RT、600~900(100刻み)である。合計5体の試験体に対して温度一定・一方向荷重漸増実験を行った。なお柱梁接合部での局部座屈の発生を防ぐ為に、図1に示す断面箇所にリブを取り付けた。

実験結果は以下の通りである。高温荷重実験から得られた曲げモーメント-部材角関係を図3に示す。同図には2次元梁要素による弾塑性の数値解析結果も併記している。縦軸

は梁端部に作用する曲げモーメント  $M$  を梁の常温全塑性モーメント  $\bar{M}_p$  で除した商である。横軸の部材角  $\theta$  は、試験体中央部の鉛直変形を試験体片側スパン長  $L$  (=800 mm) で除した商である。何れの試験体も  $\theta = 0.2$  という大変形領域まで破断することなく荷重支持した。常温実験では荷重は上昇し続け、一方、高温実験では変形の増大とともに荷重はほぼ一定か、もしくはやや低下することとなった。実験終了後の試験体観察より、溶接部には延性亀裂等は見られなかった。また、700以上の試験体においては、柱梁溶接部近傍の下フランジ板にはネッキングが、また溶接金属部にも大きな塑性変形が発生していることが確認された。図5に、800の試験体に関する実験後梁端溶接部の写真を示す。全試験体の梁端接合部においては、図5とほぼ類似の状態が観察されている。なお柱梁溶接部近傍の上フランジには、リブ補剛間において僅か



(a): RT, 600, 700 °C



(b): 800, 900 °C

Fig.3 Moment and rotation angle relationships



Fig.4 Photograph of specimen after the test [RT]

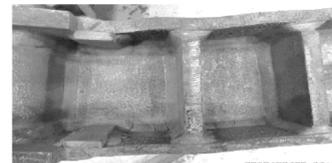


Fig.5 Photograph of specimen after the test [800 °C]

あるが面外方向の局部座屈波形も確認された。

以上より、建築構造用鋼材(SN490B)と溶接金属(YGW-11)を用いて、ノンスカラップ工法の通しダイアフラム形式柱梁溶接接合部を製作し、温度一定・荷重漸増の高温曲げ実験を実施した。また弾塑性解析により上記実験の再現を試みた。本実験の柱梁溶接接合部は部材角が0.2を超えても高温破断することなく、高温時において十分な高温耐力と変形性能を有することが確認された。

### (3)溶接接合部のシャルピー衝撃実験

上記(1)、(2)では、火災高温時の溶接接合部の延性破壊の問題を主対象としていが、一方でその脆性破壊に対する検討も必要となる。鋼材は高温化すると延性的な特性が卓越することから、火災高温時の脆性破壊に関する問題は今まで検討されてこなかった。しかしながら鋼材は青熱脆化(100~300における脆化現象)を示すために、応力集中部を多数有する溶接接合部はこの脆化現象によって火災初期段階で破断する恐れが指摘される。そこで溶接接合部の各部位(母材(BM)、溶接金属(WM)、熱影響部(HAZ))に対して、それらの脆性破壊を検討する上で最も基本的なデータが得られるシャルピー衝撃試験を高温下で実施した。

図1に試験結果を示す。試験温度は-70から600であり、各温度においてそれぞれ3体試験を行なった。同図より青熱脆化温度域(100~300)においては、一部の試験結果は常温(0)と比較して衝撃値がやや低下するが、BM、WM、HAZともに大幅な低下は見られず、また何れも延性的な破断面が観察され得た。

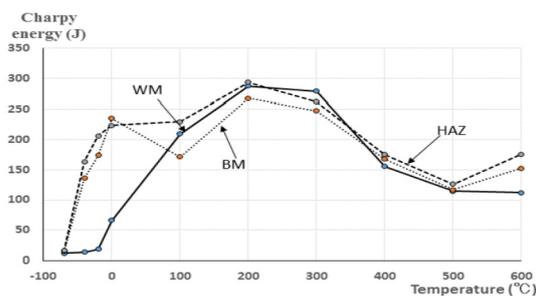


図1 高温シャルピー衝撃試験結果

### (4)鋼架構内に配された溶接接合部の脆性破壊に対する耐火性能評価法の提案

上記研究成果より溶接接合部の高温耐力は、母材とほぼ同等もしくはそれ以上が期待できること、また高温シャルピー衝撃値は青熱脆化域においても常温と比べてあまり低下しないことが分かった。ここでは、架構内に配された溶接接合部の火災初期段階における延性亀裂発生温度の評価手法を提案する。これは

火災時において発生する熱応力(断面内温度勾配に基づく引張応力)の影響を考慮することで、火災初期段階における脆性破壊の可能性を検討する方法である。

本提案方法では、梁要素の非線形有限要素解析を用いて、必要グローバル引張ひずみ  $n e_g$  を評価する。鋼材は 400MPa 級鋼とし、青熱脆化温度域で応力上昇を呈する応力~ひずみ関係式を用いる。火災時に発生する断面内温度勾配による熱応力の影響を検討するため、図1の解析モデル(以下、基本モデル)を設定した。これは梁のみが加熱され、一方、柱は温度上昇しない剛体とした。また鋼架構内の分解モデルとして、図2~4に示す3モデルも解析対象とした。

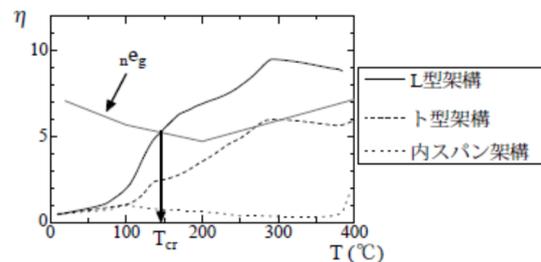
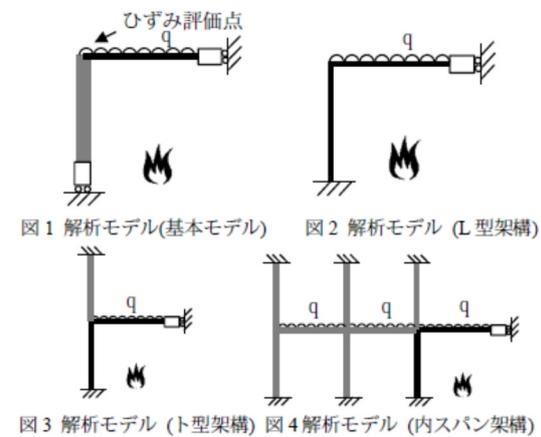


図5 ひずみ評価点での解析結果

図5に分解架構モデルの解析結果を示す。L型モデルの引張ひずみ  $n e_g$  (それを常温降伏ひずみで除したひずみ塑性率 で表記)が最も大きいことがわかる。火災加熱を受ける隣接柱に対しても断面内温度勾配の熱曲げモーメントが発生し、これが梁材端の応力状態に影響を及ぼす。特にL型架構の場合、梁端の上フランジが、梁自身の熱曲げモーメントの他にこの柱の熱曲げモーメントの反力も負担するために、当該箇所引張ひずみが大きくなる。一方T型モデルや内スパンモデルでは、柱上端が他の常温部材にも拘束され、加熱柱に発生した熱曲げモーメントはこれらの常温部材で専ら拘束されることとなるので、 $n e_g$  の発生は抑制される。さらに梁上荷重が大き

な場合は梁端部の作用引張応力も大きくなるので、火災時の引張ひずみ  $n_{eg}$  も大きくなる。この解析で評価された  $n_{eg}$  と、3軸応力度、ひずみ集中度と高温一様のびから求まる各温度の保有グローバルひずみ  $p_{eg}$  の交点の温度を、延性亀裂発生温度  $T_{cr}$  と定義する(図5)。この温度に到達すると溶接接合部局所に延性亀裂が発生することとなる。一方で、両者が交わらない場合は延性亀裂が発生しない、すなわち脆性破壊は発生しないこととなる。

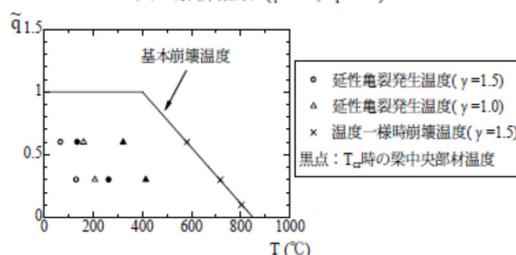


図6 崩壊温度と延性亀裂発生温度の関係

図6に、梁上荷重無次元値  $\bar{q}$  と延性亀裂発生温度  $T_{cr}$  の関係を示す。部材内温度一様の場合には梁材端の引張ひずみ  $n_{eg}$  は殆ど発生せず、この場合の解析結果( $\times$ 印)は延性亀裂が発生すること無く、梁限界たわみ温度まで到達する。これは現行設計法の高温時耐力指標である基本崩壊温度(破線)で評価可能である。一方、温度勾配を考慮した解析結果(白と黒プロット印)は延性亀裂が発生し、この延性亀裂発生温度は基本崩壊温度(破線)を下回る。また、柱が強(柱梁強度比が大き)くなると、柱の熱曲げモーメントの影響が大きくなり、 $T_{cr}$  は低くなる。本研究で提案された延性亀裂発生温度  $T_{cr}$  を用いることで、脆性破壊に対して安全側評価になると考えられるが、溶接接合部の火災時脆性破壊の危険性の有無が耐火設計実務において評価可能となる。

##### 5. 主な発表論文等

(研究代表者は下線)

[雑誌論文](計4件)

1. Kai YE, Fuminobu OZAKI: "ESTIMATION OF CHARPY IMPACT VALUES FOR STEEL WELDED CONNECTIONS AT HIGH TEMPERATURE AND AFTER HEATING AND COOLING PROCESSES", 10th International Conference on Structures in Fire, 2018/06 (採用決定)、査読有
2. 尾崎文宣、川崎有貴: 通しダイアフラム形式の柱梁溶接接合部を設けた鋼梁の耐火性能、日本建築学会構造系論文集、第740号、p.p. 1687-1694、2017年10月、査

読有

3. Taiyu Sato, Fuminobu Ozaki: Relationships between redundancy and collapse modes for steel frames at fire in case of considering variations in steel strength, The 2<sup>nd</sup> International Fire Safety Symposium, (CDROM), June 2017、査読有
4. 川崎有貴、尾崎文宣: 鋼構造溶接接合部の高温引張実験、日本建築学会構造系論文集、732号、p.p. 291-298、2017年2月、査読有

[学会発表](計9件)

1. Kai YE, Fuminobu OZAKI: ESTIMATION OF CHARPY IMPACT VALUES FOR STEEL WELDED CONNECTIONS AT HIGH TEMPERATURE, 日本建築学会東海支部研究集会(名古屋大学)、2018.2
2. 尾崎文宣、川崎有貴: 通しダイアフラム形式柱梁溶接接合部の高温曲げ実験、日本建築学会大会(広島工業大学)、2017.8
3. 川崎有貴、尾崎文宣: 鉄骨溶接接合部の耐火性能に関する実験的研究 溶接継手の高温引張試験、日本建築学会大会(福岡大学)、2016.8
4. 尾崎文宣、川崎有貴: 火災時における鋼構造建築物柱梁接合部の延性亀裂発生ひずみに関する研究 その1、日本建築学会大会(東海大学)、2015.8

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]

##### 6. 研究組織

(1)研究代表者

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