

# 高温時鋼材強度のばらつきを考慮した 多層鋼架構の崩壊温度解析

## Collapse Temperature analysis of Multilayered Steel Frames Considering Variability of Steel Strength at Elevated Temperatures

小川 大樹 (K110607)

Daiki Ogawa (K110607)

### 1. 研究背景と目的

現在の構造設計において、鋼材の設計基準強度は合格基準の下限値を採用している。しかし、実際には製造業者が異なると同じ鋼種でも強度にばらつきが生じている。常温時にはばらつき具合がまとめられているが<sup>1)</sup>、高温時には公表されているデータが少ないため、高温強度の規格値が定められないのが現状である。常温時に強度がばらついていれば、高温に達した際にもそのばらつきの影響は大きいであろうと考えられる。また、現在の耐火設計では、架構の崩壊温度を分解架構もしくは部材単体の崩壊で検討している。鋼構造建築物の部分的な区画に火災が起こると、火災室に面する柱は、熱せられて降伏耐力が低下して、やがて座屈に至り、その圧縮耐力は直ちに低下し始める。しかし、架構局部に塑性化や損傷が進行しても、その周辺の部材に応力再配分が行われるため、架構全体の安定性は直ちに損なわれないことが明らかになっている<sup>2)</sup>。したがって、現在の設計方法では、安全側には評価できるが、応力再配分を考慮していないため、真の架構の耐火性能を検証できていない。

以上より、本研究では、高温引張試験を行い、公表できるデータを蓄積するとともに、高温時における鋼材強度のばらつきを考慮した架構と考慮していない架構の崩壊温度を比較し、ばらつきがどの程度架構に影響を及ぼすのかを検討する。なお、ここで述べている崩壊温度とは、架構が終局状態に到達したときの温度のことである。

### 2. 高温引張試験

#### 2.1 実験方法

本実験は JIS G 0567 の「鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法」に基づいて行った。しかし、現在の本学のアムスラー試験機では、JIS に規定されているひずみ制御（降伏強度まで 0.3%/min、それ以降は 7.5%/min）ができないため、上記の試験方法に近づくように、荷重方法を応力制御（0.5 kN/mm<sup>2</sup>/s）から変位制御（5%/min）に自動切換するように設定した。昇温には電気炉を用い、昇温温度は 400, 500, 600, 700 °C の 4 種で、熱電対にて設定温度まで昇温した後 15 分以上保持しつつ引張試験を行った。試験片は JIS Z 2201 に規定される II 型試験片（図 1）を用いており、各温度で使用した試験片のミルシート

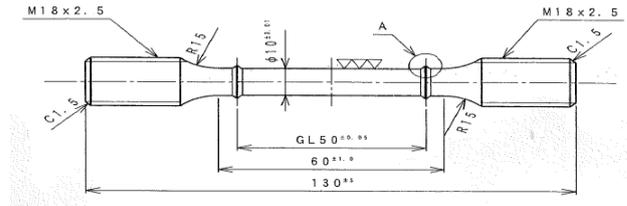


図 1 II 型試験片

表 1 ミルシート値

鋼種	降伏強度(N/mm <sup>2</sup> )	引張強度(N/mm <sup>2</sup> )
SS400①	325	474
SS400②	315	439
SNR400	333	466

表 2 試験体数

鋼種	400°C	500°C	600°C	700°C
SS400①	3	2	3	3
SS400②	1	1	2	0
SNR400	1	1	1	1

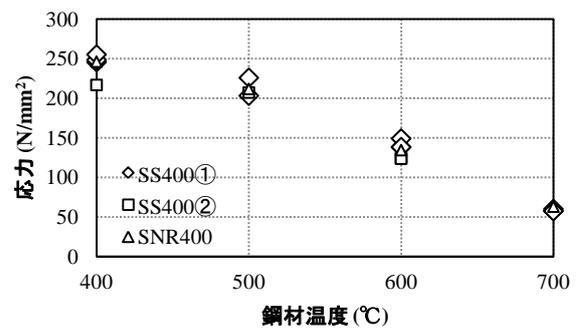


図 2 1%耐力

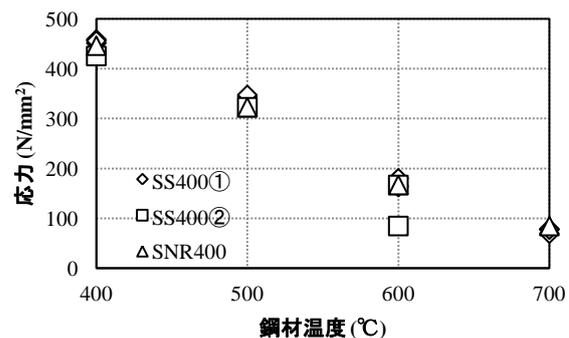


図 3 引張強度

値は表1、試験体数は表2の通りである。ここでSNR鋼とは、SN鋼と鋼材の成分や性能が全く同一の棒鋼のことである。

## 2.2 実験結果

図2に高温引張試験の各温度の1%耐力、図3に引張強度を示す。どちらも高温になるほど強度が低下しており、ほぼ線形的な低下傾向にあることが分かる。本来は鋼種ごとで比較するのだが、試験対数が少なかったため、参考結果としてまとめさせていただいた。今後はより多くのロット数で引張試験を行い、鋼種別にデータを蓄積することが課題である。

## 3. ばらつきを考慮した高温応力ひずみ関係

### 3.1 鋼構造体耐火設計指針の応力ひずみ関係

これは、古村氏らによって提案された、高温素材試験に基づく近似式のひずみ2.5%以降の応力を修正した式であり、以下の(1)~(4)式で構成されている。

$$\sigma(\varepsilon) = \max\{\sigma_1(\varepsilon), \sigma_2(\varepsilon)\} \quad (1)$$

$$\sigma_1(\varepsilon) = \min\{E\varepsilon, \sigma_{yT}\} \quad (2)$$

$$\sigma_2(\varepsilon) = f_1(\varepsilon) + f_2(\varepsilon) \quad (3)$$

$$f_1(\varepsilon) = \frac{E_0\varepsilon}{\left\{1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^n\right\}^{\frac{1}{n}}}, \quad f_2(\varepsilon) = \frac{E_t\varepsilon}{\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_2}\right)^2}} \quad (4)$$

ここに、

$E$ : 初期弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)

$E_t$ : 応力ひずみ関係の硬化の大きさを決定する係数 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{yT}$ : 降伏棚応力 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_0$ : 引張強度の大きさを決定する応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$n$ : 応力ひずみ関係の形状を表す無次元の指数

また、 $E_0 = E - E_t$ ,  $\varepsilon_0 = \sigma_0 / E_0$ ,  $\varepsilon_2 = 0.05$

### 3.2 高温応力ひずみ関係の生成

崩壊温度のばらつきを検討するにはばらつきを考慮した応力ひずみ関係が必要不可欠である。したがって、実験結果と文献<sup>1)</sup>を参考に、高温応力ひずみ関係の生成を試みた。生成にあたっては鋼構造耐火設計指針 (AIJ 指針) の応力ひずみ関係式をベースにし、以下の目標値を満たすように設定した。

① 常温 (20°C) 時 1% 耐力  $\sigma_{01}$  の変動係数  $V_{\sigma_{01}}$  が  $0.060 \leq V_{\sigma_{01}} \leq 0.070$  を満たす。

② 常温時 20% 耐力  $\sigma_{20} < 400$  N/mm<sup>2</sup>, または  $\sigma_{20} > 510$  N/mm<sup>2</sup> となるような確率が 1% 以下である。

本研究では、応力ひずみ式のパラメーターのうち、 $\sigma_0, E_t$  をモンテカルロシミュレーションにて正規分布に従ってばらつかせ、応力ひずみ関係を生成する。以下に生成手順を示す。

i.  $\sigma_u^{AIJ}$ ,  $\sigma_0$  の変動係数  $V_u, V_{\sigma_0}$  を導く。ここで、 $\sigma_u^{AIJ}$  は AIJ 指針応力ひずみの引張強度であり、 $\sigma_0$  と  $\varepsilon_2$  は AIJ 指針と同様の値とする。まず、引張強度の平均値は

$$\bar{\sigma}_u = \bar{\sigma}_0 + \bar{E}_t \varepsilon_2 \quad (5)$$

であるから、

$$\bar{\sigma}_0 + \bar{E}_t \varepsilon_2 = \frac{\sigma_u^{AIJ}}{1 - 3V_u} \quad (6)$$

また、

$$\bar{\sigma}_0(1 - 3V_{\sigma_0}) + \bar{E}_t(1 - 3V_{E_t})\varepsilon_2 = \sigma_u^{AIJ} \quad (7)$$

両式の差をとると、

$$\bar{\sigma}_0 V_{\sigma_0} + \bar{E}_t V_{E_t} \varepsilon_2 = \sigma_u^{AIJ} \frac{V_u}{1 - 3V_u} \quad (8)$$

(6)式を変形すると

$$\bar{E}_t = \frac{1}{\varepsilon_2} \left\{ \frac{\sigma_u^{AIJ}}{1 - 3V_u} - \bar{\sigma}_0 \right\} \quad (9)$$

これを(7)に代入して

$$V_{E_t} = \frac{1}{\bar{E}_t \varepsilon_2} \left\{ \frac{\sigma_u^{AIJ} V_u}{1 - 3V_u} - \bar{\sigma}_0 V_{\sigma_0} \right\} \quad (10)$$

$V_{E_t} \geq 0$  であるため、

$$V_{\sigma_0} \leq \frac{\sigma_u^{AIJ} V_u}{\bar{\sigma}_0(1 - 3V_u)} \quad (11)$$

以上の式から、 $V_u = 0.06$ ,  $V_{\sigma_0} = 0.076$  (ともに全温度共通) と設定することで、目標①が達成された。図5に手順iで生成した  $\sigma_0$  の折線を示す。破線で示した折線は、実線の値にばらつきを与えた値の平均値である。図6には  $E_t$  の折線を示す。破線で示した折線は、(9)式から得た結果をプロットしており、500°C以上ではAIJ指針の規定値とほとんど変わらない結果となった。

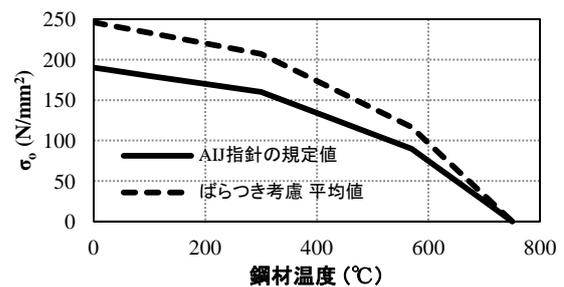


図5  $\sigma_0$  の折線

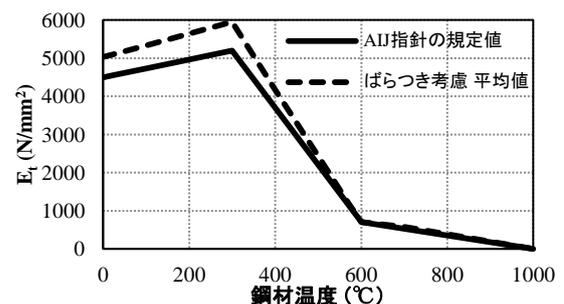


図6  $E_t$  の折線

- ii. 600°Cの $\sigma_0, E_t$ のばらつきを生成する。まず、 $\bar{\sigma}_0$ は(11)式を用いて、

$$\bar{\sigma}_0 = \frac{\sigma_0}{1 - 3V_{\sigma_0}} \quad (12)$$

$\sigma_0$ の標準偏差 $\sigma_{\sigma_0}$ は、

$$\sigma_{\sigma_0} = \frac{\bar{\sigma}_0 - \sigma_0}{3} \quad (13)$$

$E_t$ は(9),(10)式より、

$$E_t = \bar{E}_t(1 - 3V_{E_t}) \quad (14)$$

$E_t$ の標準偏差 $\sigma_{E_t}$ は、

$$\sigma_{E_t} = \frac{\bar{E}_t - E_t}{3} \quad (15)$$

以上より、600°C時の $\sigma_0, E_t$ のばらつきを生成する。

- iii. その他の温度でも同様に $\sigma_0, E_t$ のばらつきを生成する。ばらつかせた $\sigma_0, E_t$ が AIJ 指針の $\sigma_0, E_t$ 折線に完全相関するように、

$$\sigma_{oi} = \bar{\sigma}_0 + k_{\sigma_{oi}}\sigma_{\sigma_0}, \quad E_{ti} = \bar{E}_t + k_{E_{ti}}\sigma_{E_t} \quad (16)$$

( $k_{\sigma_{oi}}, k_{E_{ti}}$ はばらつきの範囲を表す係数)さらに(15)式を変形させて

$$k_{\sigma_{oi}} = \frac{\sigma_{oi} - \bar{\sigma}_0}{\sigma_{\sigma_0}}, \quad k_{E_{ti}} = \frac{E_{ti} - \bar{E}_t}{\sigma_{E_t}} \quad (17)$$

(17)式の $k_{\sigma_{oi}}, k_{E_{ti}}$ を各温度の応力ひずみ関係式に当てはめることで、均等な割合で応力が増加する応力ひずみ関係が作成できる。

- iv. 別のパラメーター $\varepsilon_2$ を調節して応力ひずみ曲線のサンプルを生成する。手順iiiのままでは目標②が達成できなかったため、大ひずみ域に多大な影響を及ぼす $\varepsilon_2$ の値を変えて生成する。設定を調節したところ、 $\varepsilon_2 = 0.042$ とすることで目標②が達成できた。

### 3.3 生成結果

図7に常温時1%耐力と20%耐力のヒストグラムを示す。サンプル数3000で作成しており、1%耐力では平均値: 287.4 N/mm<sup>2</sup>, 変動係数: 0.061で、20%耐力では平均値: 457.4 N/mm<sup>2</sup>, 変動係数: 0.046であったため、目標①、②を満たしている。図8では同一条件で作成した600°C時のヒストグラムを示す。1%耐力の変動係数が0.070であったため、目標①を満たしている。以上の図7,8から1つのサンプルを取り出して作成したのが図9の応力ひずみ関係である。図中には各温度時の $\sigma_0, E_t$ を示しており、値が図5,6で示したような変化をしていることがわかる。しかし、1%耐力付近では降伏棚が小さくなってしまっている。これは、AIJ指針に記載された降伏棚応力の固定値を考慮していないためである。今回は主に2つのパラメーターをばらつかせて応力ひずみ関係を生成したが、今後はより「形状」を近似させるため、降伏棚応力を含め別のパラメーターも考慮して生成する必要がある。

## 4 多層平面架構の崩壊温度解析

### 4.1 解析プログラム

解析に使用するプログラムは、鋼材の高温弾塑性と線膨張、部材の有限変位を考慮した2次元の非線形有限要素解析である。

### 4.2 解析対象架構

図10に解析に使用する架構と柱梁断面リストを

示す。解析架構は15層2スパンの純ラーメンで、鋼種は全部材SS400である。断面の形状が、柱では8通り、梁では7通りの計15通りの形状で構成されている。荷重は梁で全負担するものとし、梁上荷重は架構中最も軸力がかかる1FのC2柱頭に、軸力比 $p = 0.3, 0.4, 0.5$ となるようにG1梁上荷重 $w_1$ とG2梁上荷重 $w_2$ を全層共通で設定した。なお、軸力比は、C2柱頭にかかる軸力を断面の降伏軸力で除した値とした。

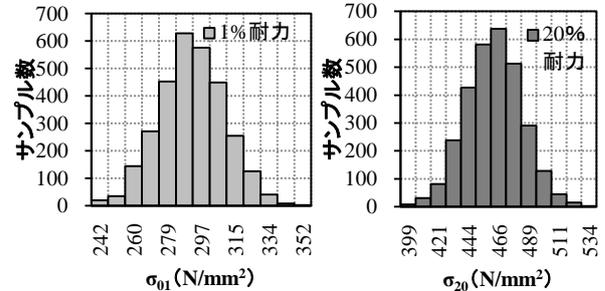


図7 常温時1%耐力と20%耐力のヒストグラム

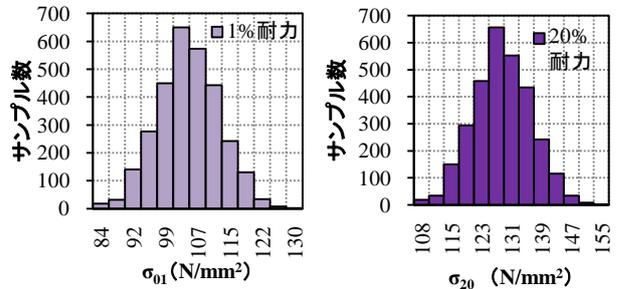


図8 600°C時1%耐力と20%耐力のヒストグラム

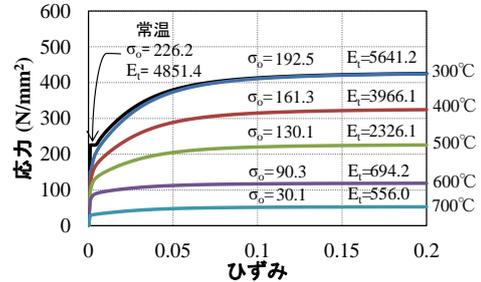


図9 応力ひずみ関係サンプル

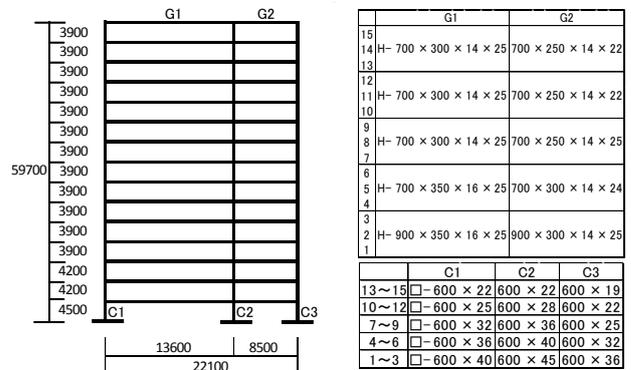


図10 多層平面架構と柱梁断面リスト

### 4.3 高温応力ひずみ関係のばらつきと火災室の設定

3節で生成した応力ひずみ関係を用いて、以下の3パターンのばらつきを与える。

パターン1. AIJ指針で規定された応力ひずみ(確

定値)を全部材に与える。

- パターン 2a. 生成した応力ひずみ関係のうち 1 種を、全部材共通に与えて、繰り返し解析を行う。
- パターン 2b. 断面寸法が異なるものごとに、異なる応力ひずみ関係を与えて、繰り返し解析を行う。柱梁で異なる断面が 15 通りあるため、1 回の解析で 15 種の応力ひずみ関係を与える。

解析には 200 サンプルのシミュレーションを行い、そこから得た崩壊温度の平均値を考察対象とした。火災室は単一区画(左右の 2 ケース)と全区画を 1 階、8 階、15 階、計 9 ケースで設定し、火災室に面する部材の温度は、柱梁ともに均等に上昇するものとした。

#### 4.4 解析結果

図 11 (上) に各火災室とばらつき 3 パターンの崩壊温度関係(左から、パターン 1, パターン 2a, パターン 2b)を示す。全ての層で共通しているのは、崩壊温度が全スパン(ALL) < G1 側スパン(G1) < G2 側スパン(G2) ということである。C1~C3 にかかる荷重を比較すると、 $C2 < C1 < C3$  であること、そしてスパン長が  $G2 < G1$  であることより、荷重の負担が少なく、かつ火災室のスパン長が短い G2 の崩壊温度が高くなる。スパン長が長くなるほど加熱された梁の膨張が大きくなる。伸び出した梁が拘束の小さい外側の柱を押し出す形になるため、座屈が起りやすくなり、崩壊温度の低下につながる。次に各層で比較すると、最も荷重がかかる 1F は崩壊温度が低く、続いて G2 を除いて 15F, 8F の順となっている。15F-G2 で最も崩壊温度が高くなるのは、G2 の中でも最も荷重の負担が少ないからである。ばらつきのパターンで比較すると、確定値を用いたパターン 1 が最も低く、2a, 2b はほとんど変わらない結果となった。しかし、崩壊温度の変動係数で比較してみると、若干の差ではあるが 2a の方がばらつきについていることが分かる(図 11 (下))。また、崩壊温度が低いか所ほどばらつきが生じ、高いか所ほどばらつきが小さい。

図 12 (上) に、パターン 2a における軸力比と崩壊温度の関係(左から、 $p=0.3, 0.4, 0.5$ )を示す。荷重の負担が大きくなるほど崩壊温度は低くなり、最も荷重がかかる 1F では、どのスパンにおいても軸力比が 0.1 増加すると、約 30°C 崩壊温度が低下している。ただし、崩壊温度が各層に比べて高い 8F と、15F-G2 では崩壊温度の低下値が低くなっており、全ての火災室で同様結果が得られるわけではない。軸力比と崩壊温度のばらつきを比較してみると(図 12 (下))、軸力比が高いほど崩壊温度のばらつきが大きくなっている。

#### 5 まとめ

本研究では、高温引張試験を行い、その結果を参考にばらつきを考慮した応力ひずみ関係の生成法を提案した。さらに、提案法による応力ひずみ関係をもつ鋼部材で構成された多層平面架構の崩壊温度解析を行った。以下にその知見を示す。

- 各温度の 1% 耐力の変動係数が 6~7% で、かつ、常温時 20% 耐力が 400 N/mm<sup>2</sup> 未満、または 510 N/mm<sup>2</sup> 以上となる確率が 1% 以下であるばらつきを考慮した応力ひずみ関係を生成できた。
- 鋼材強度のばらつきは架構の崩壊温度に影響を与えるが、生成した高温応力ひずみ関係の変動係数値に比べて崩壊温度のそれは小さい。

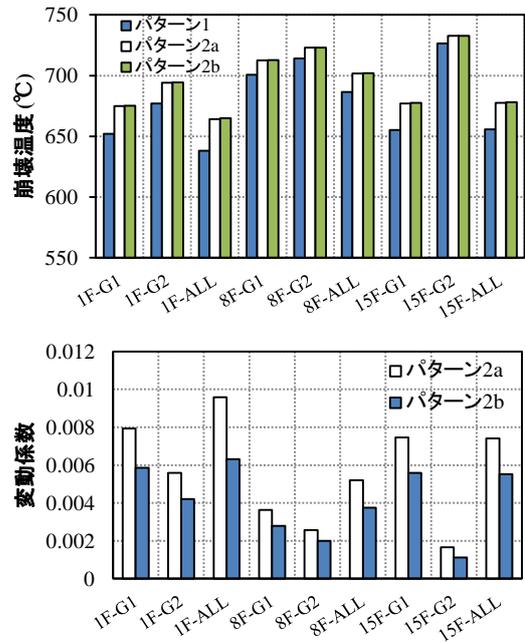


図 11 火災室と崩壊温度の関係

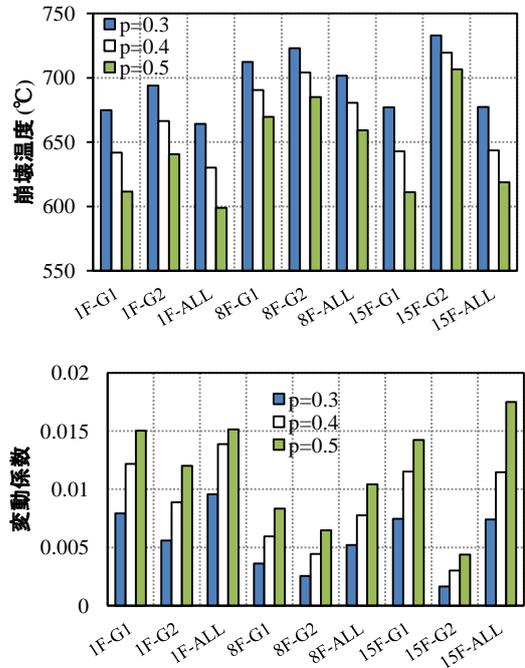


図 12 軸力比と崩壊温度の関係

- 軸力比が大きくなるほど崩壊温度は低下し、変動係数は大きくなる。逆に崩壊温度が上昇すれば、変動係数は小さくなる。

**謝辞:** 本研究を進めるに当たり、解析プログラムの提供と数々の助言をいただいた建築研究所の鈴木淳一博士(工)と筑波大学の鈴木弘之教授に心より感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 日本建築学会:「建築物の限界状態設計指針」, 日本建築学会, 2002.12
- 鈴木弘之ほか:「火災加熱を受ける鋼架構の構造安定性」, 日本建築学会構造系論文集, 2003.9
- 日本建築学会:「鋼構造耐火設計指針」, 日本建築学会, 2008.3
- 鈴木淳一ほか:「火災加熱における鋼架構の崩壊温度とリダンダンシー: 耐震設計が耐火性能に与える効果」, 日本建築学会構造系論文集, 2006.10