

アルミニウム合金構造への沸騰水冷式耐火システムによる耐火性能付与に関する研究

Study on aluminum structure's fire proof capability by utilizing water-cooling system

早稲田大学 理工学術院 特任教授 新谷 真人

(研究計画ないし研究手法の概略)

アルミニウム合金（以下、アルミ）は、部材内部温度が200℃に達すると強度が約60%、ヤング係数が約80%に低減し、350℃で強度を失う。このように強度の温度依存性が高く、また比較的低温で強度を失う特性を持つアルミは構造用材料として認定されているものの耐火性に劣るため、アルミ造建築の規模・用途・場所が実質制限されているのが現状である。

本研究では、アルミ部材の部材表面を活かすために、沸騰水冷式耐火システムを用いた無耐火被覆での耐火性能付与を目指す。沸騰水冷式耐火システムとは、火災時に、内部に水を充填した閉鎖型断面を持つアルミ部材が、火災時の熱を水の顕熱と沸騰潜熱として吸熱し、温度上昇を抑制することを目的とした耐火手法である。沸騰水冷式耐火システムの耐火性能付与の検証のために、本研究では、1. 単一材（壁・床材）の加熱試験、2. アルミニウム合金部材の提案と加熱試験、について研究を行った。以下に沸騰水冷式耐火システムの概要及び、研究概要を示す。

水冷式耐火構造とは、水が体気圧下で約100℃で沸騰することと、水の高い顕熱と潜熱を利用した耐火システムである。水冷式耐火構造自体は鋼構造においてUSスチールやポンピドーセンターなど欧米で約30件の実施例が存在し、鋼構造の水冷方法は自然循環方式と機械循環方式の2種類に分けられる。最も実施例が多い自然循環方式は、水の温度差を用いて自然循環させる方法であるが、循環のために部材内部にパイプを必要とするなど大規模建築向きであり、本研究で対象とする規模のアルミ造建築には向かないと考えた。また、日本は地震国であり、地震後の火災に対し安全である必要があることから、動力を必要とするポンプを使い循環させる機械循環式も不適當であると考えた。そこで、本研究では、部材内部に水を充填し、火災時には部材上部に溜まる蒸気を蒸気減圧弁を用いることで部材外部に排出し減圧、水を自然給水することを考えた。これを沸騰水冷式耐火システムとする。沸騰水冷式では、部材内に水を充填しておくため、部材が大規模にならないというメリットを持つ。当研究室における既往研究において、水を流す流水水冷式と沸騰水冷式を適用した簡易の実験を行った結果、使用水量において大幅に削減できることを試験により確認した。これらの知見を踏まえ、アルミ耐火建築の実現のためには沸騰水冷式が適していると考え本研究を実施した。

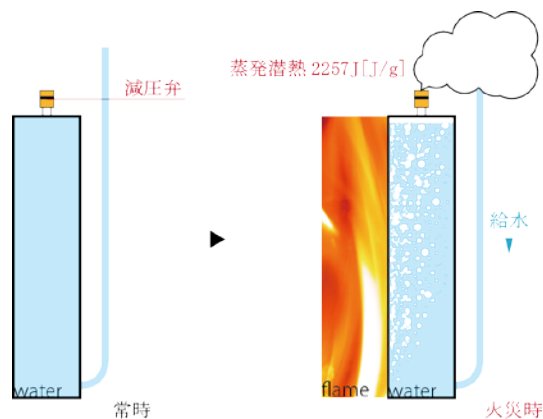


図1 沸騰水冷式概念図

(実験調査によって得られた新しい知見)

1. 壁・床材を想定したアルミ部材の基本耐火性能の把握

1-1. 壁・床材を想定したアルミ部材の基本耐火性能把握のための加熱試験

沸騰水冷式耐火システムでは、部材温度の把握のために沸騰熱伝達の把握が重要となる。沸騰時の熱伝達に関しては機械系の分野で種々の研究が行われており、本耐火システムで対象になる液体の核沸騰時の熱流束についても、様々な伝熱特性の式が提案されている。それらの式は概ね式(1)の形式で表わされる。

$$q = C\Delta T_{sat}^m \tag{1}$$

q : 熱流束 ΔT_{sat} : 過熱度

沸騰水冷式耐火システムを用いたアルミ部材の伝熱性状の把握を行うために、部材表面温度及び熱流束を計測し、小型試験炉を用いて耐火試験を行った。沸騰時の対流や気泡の影響があると考えられたことから、壁等に用いる側面を加熱する鉛直材と、床等に用いる下面を加熱する水平材の二種類の加熱形式に対して試験体を用意し加熱試験を行った。試験体寸法を、図2, 3及び表1, 2に示す。加熱温度はIS0834とし、1時間時の温度で20分間の定常加熱を1時間後に行った。

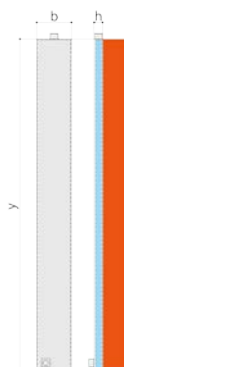


図2 鉛直材試験体寸法



図3 水平材試験体寸法

表1 鉛直材試験体寸法

試験体No.	部材内部厚さh [mm]	加熱幅b [mm]	加熱長さy [mm]
No.1	24	125	1200
No.2	34		
No.3	64		

部材板厚は3mm

表2 水平材試験体寸法

試験体No.	部材内部厚さh [mm]	加熱幅b [mm]	加熱長さy [mm]
No.1	30	125	1000
No.2	60		
No.3	90		

部材板厚は3mm

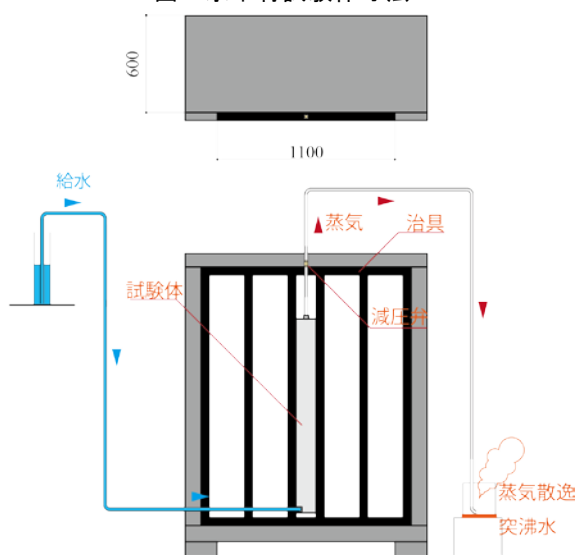


図4 鉛直材試験概要

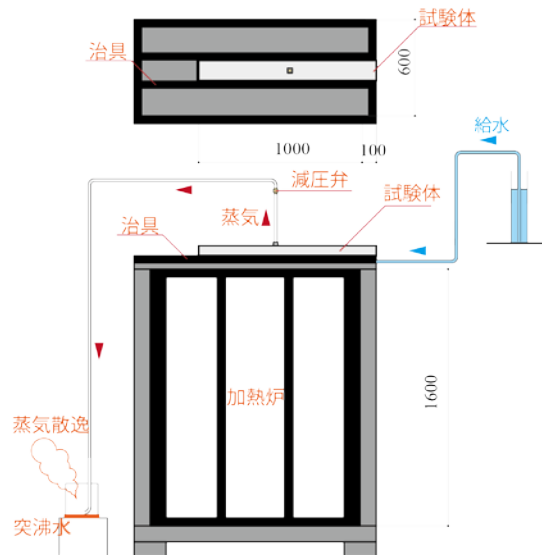


図5 水平材試験概要

1-2. 壁・床材を想定したアルミ部材の基本耐火性能把握のための加熱試験の結果

試験により得られた加熱空気温度と加熱面温度と温度の関係を示す(図6, 7)。部材表面温度は、内部に充填された水の温度上昇に伴い上昇し、裏面温度が水の飽和温度である約100℃になると常時沸騰するとともに大きな変化を生じなくなる。本加熱試験では、核沸騰からの遷移により部材表面の温度が急激に上昇するバーンアウト現象も発生しなかった。以上の結果から、部材温度は強度が6割に低減する200℃以下に収まっており、裏面温度も100℃程度となり、部材に耐火性能を付与できたものと考えられる。1時間加熱後の定常状態での部材温度及び熱流束値について表3, 4に示す。

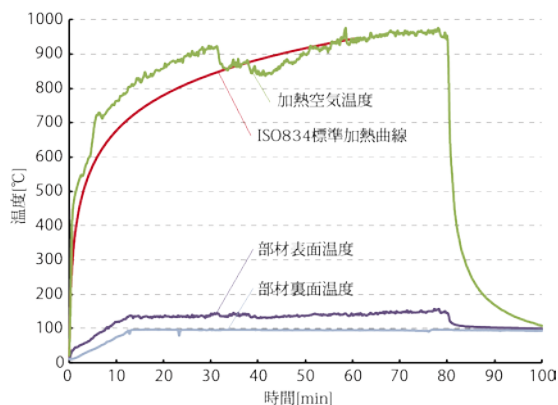


図6 鉛直材試験結果 (No. 1)



写真1 鉛直材試験写真

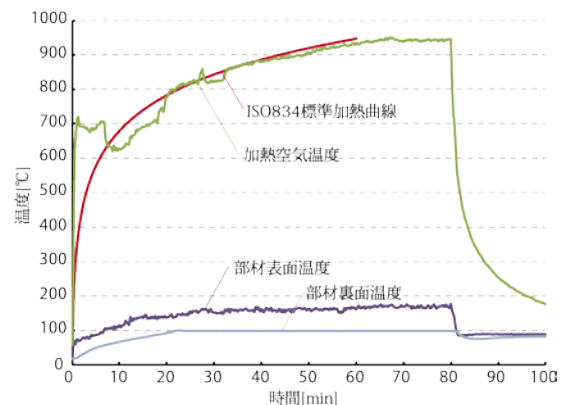


図7 水平材試験結果 (No. 1)



写真2 水平材試験写真

表3 鉛直材試験結果 (定常時の部材温度)

試験体	内部厚さh [mm]	測定点位置[mm]					平均	熱流束 [W/m ²]
		ch1	ch2	ch3	ch4	ch5		
No.1	24	108.2	129.8	137.8	136.9	159.2	134.4	14864.6
No.1-2		100.1	152.3	177.3	147.8	157.4	147	12282.8
No.2	34	108.7	142.6	142.3	133.1	190.3	143.4	11078.5
No.3	64	131.1	154.6	146	158.7	170.6	152.2	12329.1

表4 水平材試験結果 (定常時の部材温度)

試験体	内部厚さh [mm]	測定点					平均	熱流束 [W/m ²]
		ch1	ch2	ch3	ch4	ch5		
No.1	30	156.3	179.9	168.4	144.2	176.8	165.1	10887.4
No.2	60	133.7	150.8	134	136.1	165.7	144	12140.4
No.3	90	137	157.3	201.1	145.4	152.1	158.6	12688.9

本試験結果から耐火炉モデル¹⁾を作成し、既往研究の試験結果を含めた熱流束と部材表面温度の関係を西川ら¹⁾により提唱されている沸騰時の吸熱熱流束の半理論的整理式を基準として算出する。沸騰水冷式では、一般的な核沸騰と比較して部材内部に水蒸気となった多量の気体が混在した不安定な状態での沸騰伝熱となることから、沸騰時の熱伝達率が小さくなることが考えられる。そのため、実験により得られる値との比率を α とし、式(2-1)、(2-2)のように整理すると、 α は図8、9のようになる。また、試験結果の値を最小二乗法により結び赤線のようにする。これらの値を用い、解析を行うことにより、沸騰水冷式の単材では耐火性能を付与できることを確認した。

$$\text{層流域: } q_{wb} = (\alpha \cdot 6.24)^3 \left[\left(\frac{1}{M^2 N} \right) \frac{\lambda_L^2 \cdot c_{PL} \cdot \rho_L^2 \cdot g}{\sigma \cdot L \cdot \rho_V} \right] (f_\xi f_p)^2 (T_{al_in} - T_{wb})^3 \quad (2-1)$$

$$\text{乱流域: } q_{wb} = \frac{(\alpha \cdot 0.66)^5}{l} \left[\left(\frac{1}{M^2 N} \right) \frac{\lambda_L^2 \cdot c_{PL} \cdot \rho_L^2 \cdot g}{\sigma \cdot L \cdot \rho_V} \right]^2 (f_\xi f_p)^4 (T_{al_in} - T_{wb})^5 \quad (2-2)$$

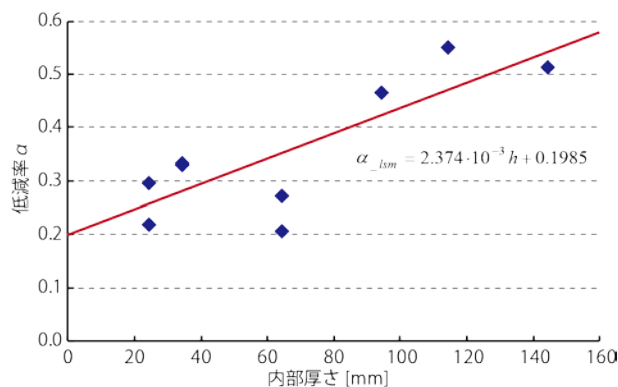


図8 鉛直材の低減率 α

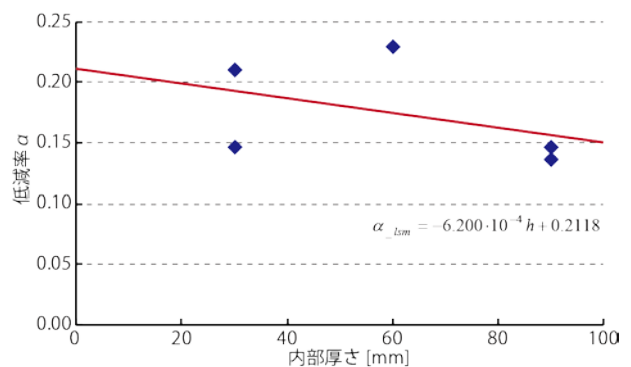


図9 水平材の低減率 α

内部厚さが大きくなればよりプール沸騰に近付く為、本来は正の傾きとなると考えられるが水平材の最小二乗法による低減率 α_{lsm} が負の傾きを持っている。これは、沸騰現象における実験の誤差が部材表面等に影響を受け大きく生じるためであると考えられる。そのため、パラメータを増やし、実験データの蓄積を進める必要がある。

2. アルミニウム合金の柱・梁部材及び接合形式の提案と加熱試験

2.1 アルミニウム合金の柱・梁部材及び接合形式の提案と加熱試験の概要

壁・床材を想定したアルミ部材の基本性能把握のための加熱試験の結果を踏まえ、沸騰水冷式耐火システムを用いたアルミ構造の部材の開発及び耐火試験を行う。提案する柱材断面は図10、梁材断面は図11とした。水の供給経路と、アルミの溶接時の強度の低下を考慮し、柱材では芯材・芯抑え材・座屈補剛材からなる座屈補剛柱の形式とした。また、梁材では、H型形状を基本とする形状とした。部材接合は図12のように梁のウェブを芯材間に落とし込み、中ボルトにより支圧接合する。また、水の経路は図13のように、柱材下部より給水し、柱材上部から梁材に接続する形式とした。

耐火試験は、小型水平炉および小型壁炉を用いて行う (図14, 15)。部材断面形状は実寸とし、加熱温度はIS0834によるものとした。また、柱材では、試験に用いる炉の大きさから、

座屈補剛材一面に対して実験を行った。

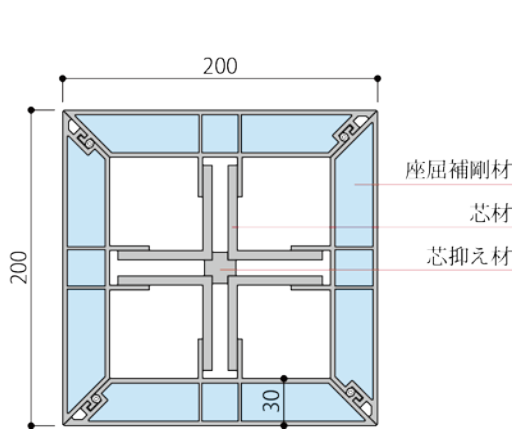


図10 柱材断面形状

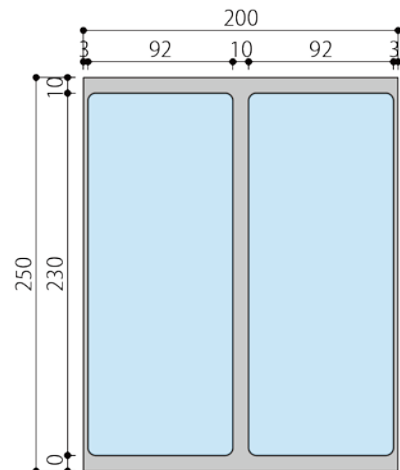


図11 梁材断面形状

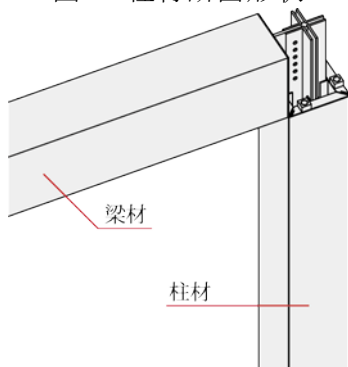


図12 部材接合方法

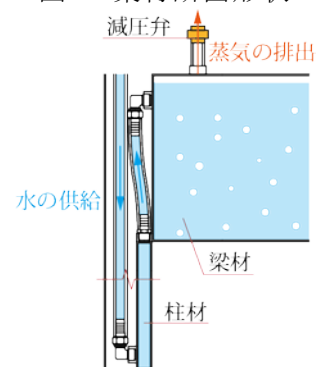


図13 水の経路

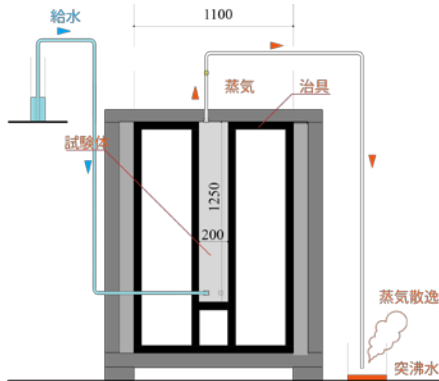


図14 柱座屈補剛材要素試験概要

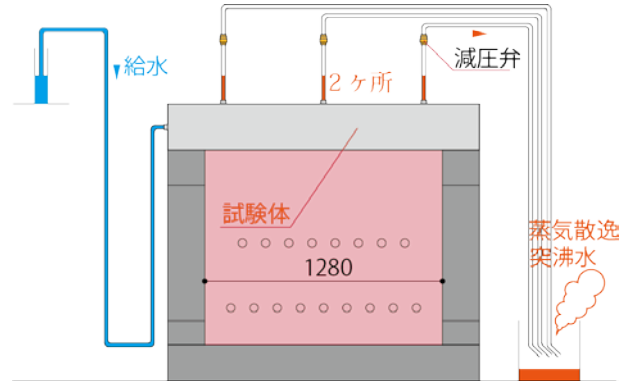


図15 梁材試験概要

2.2 アルミニウム合金の柱・梁部材及び接合形式の提案と加熱試験の結果

柱材及び梁材の各点での温度の結果を図16, 17に示す。単一材と同様に、部材表面温度は裏面温度100度まで上昇し、内部の水の沸騰が生じると部材温度の大きな上昇は生じない結果である。部材温度はおおよそ200℃以下となり、耐火性能付与の可能性が示された。

試験結果を式(2-1, 2-2)に適用した際の α と、単一材の試験結果の最小二乗法により求めた α_{lsm} の比較を表5に示す。柱材においては、低減率において良い一致を見せているものの、梁材においては低減率が大きく異なる結果となった。これは、加熱面の違いによる対流等に起因していると考えられる。そのため、三面加熱などの場合においては、単一材とは異なる低減率の算出が必要になると考える。

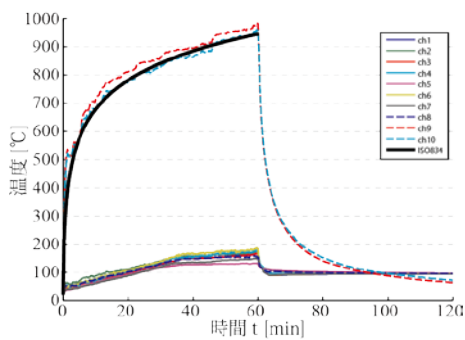


図16 梁材加熱試験結果及び熱電対位置

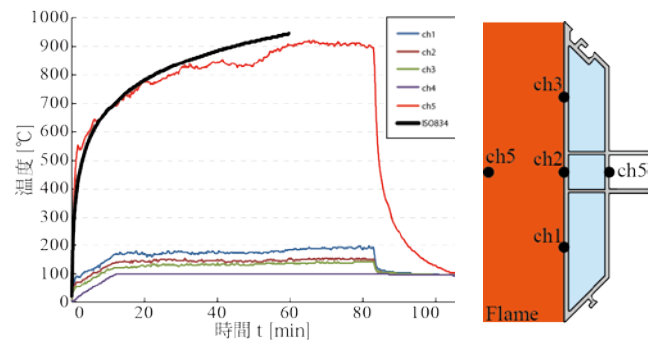


図17 柱材加熱試験結果及び熱電対位置

表5 柱材・梁材の低減率 α

試験体	柱材	梁材	
		底面	側面
低減率 α	0.2522	0.2148	0.2388
α_{ism}	0.2555	0.0692	0.4122

3. まとめ

沸騰水冷式耐火システムを用いた梁材をおよび柱材を提案し、梁材及び、柱座屈補剛材で実大の断面で長さを縮小した加熱試験により耐火性能付与の可能性を示した。

今後、実大長部材、骨組みでの耐火試験を行うことで、中大規模のアルミ耐火建築の実現を目指す。また、沸騰現象では伝熱面の表面状態によって大きく誤差を生じることがあることから、試験体数を増やして加熱試験のデータを蓄積していくことが必要であると考え。

・参考文献

- 1) 茂木武:防火・耐火試験における加熱特性について, 日本建築学会学術講演会梗概集, 1983.9
- 2) 西川兼康, 藤田恭伸:伝熱学, 理工学社, 1982
- 3) 新谷真人, 平間英明, 永井拓生, 今井大樹:水冷を用いたアルミニウム合金構造材の耐火性能付与に関する研究 その1 軸材への適用, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2009.8
- 4) 今井大樹, 新谷真人, 永井拓生, 平間英明:水冷を用いたアルミニウム合金構造材の耐火性能付与に関する研究 その2面材への適用, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2009.8
- 5) 今井大樹, 下田亮太, 新谷真人, 永井拓生:沸騰水冷式を用いたアルミニウム合金床材の耐火性能付与に関する研究, 2011.7

(発 表 論 文)

- ・ 未発表