

雪氷消火システムの調査検証 (第1報)

玉越孝一*、飯田明彦*、根本昌平*、菅原洋一**

概要

本検証は、氷を消火に用いるための消火効率を検証するため、放射条件を変えた消火実験を行った。結果、氷の粒子径が放射範囲に、氷の含水率(氷に水を付着させたもの)は、冷却効果や付着効果に影響があること、高温環境下においても氷の放射条件により壁面に付着することを確認した。

1 はじめに

本検証は、平成17年度から18年度の2年間において氷を活用した消火について検証するとともに、災害現場での氷の活用方策について調査・検討を行うものである。

2 平成17年度の検証目的について

平成17年度は、氷を建物火災の消火に用いた場合の消火効率について検証することを目的とする。

3 雪氷消火システムについて

雪氷消火システムの基本構成は、図1のように、給水機から送られた水は、製氷機で氷チップに、砕氷機で規定の大きさとなり、送風機で加圧された輸送管内を流れ、ノズル先端から氷と空気を同時に放射することができる。

また、ノズルの先端に水を混合するための特殊な装置を取り付けることにより、氷と水と空気の同時放射が可能となる。

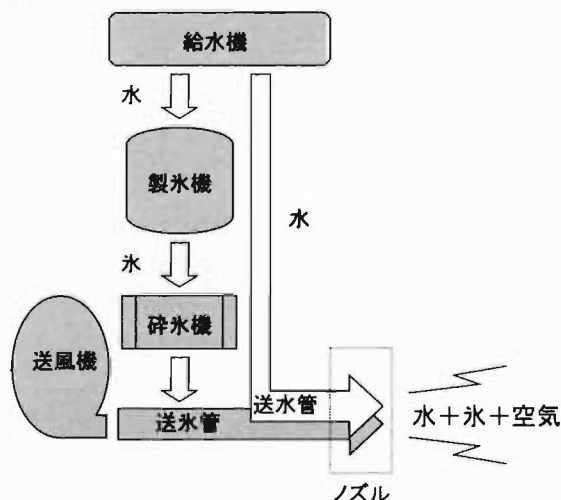


図1 基本構成図



写真1 装置前景



写真2 製氷機



写真3 砕氷機



写真4 送風機



写真5 ノズル



写真6 氷の輸送状況

装置は、(株)東洋製作所が所有している機器を使用し実験を行った。表1にその主な仕様を示す。

表1 実験装置の主な仕様

項目	内容
粒子径	0.2mm以上
製氷量	950kg/25h (0.63kg/min) 注1
砕氷機	約8kg/min
放射距離	送風機の送風量により設定する。

注1 実験では、予め、製氷しておいた氷を人力で砕氷機に投入し、氷の放射を行った。従って、実際の放射量は実験ごとに多少異なる。

4 実験方法の検討

(1) 氷を消火に使用する利点からの検討

氷を消火に使用する利点としては、氷の融解熱を活用して燃焼物体から熱エネルギーを取り温度を下げることで、氷を付着させて持続的な冷却による温度降下と燃焼物体を氷で覆うことで、燃焼物体から発生する可燃性ガスを抑え、酸素との接触をさえぎること、付着による目視効果で無駄な放射をさけることにあると考える。

ア 氷による冷却効果について

(イ) 潜熱について

水は、固体と液体と気体の間を変化するとき、熱を吸収したり、放出したりする。0℃～100℃の間は、温度上昇を伴うが、氷と水、水と水蒸気が共存する部分では、温度変化を伴わず熱エネルギーの吸収、放出が行われる。この部分を「潜熱」という。図2は、水の相変化に伴う必要な熱エネルギーを示したものである。

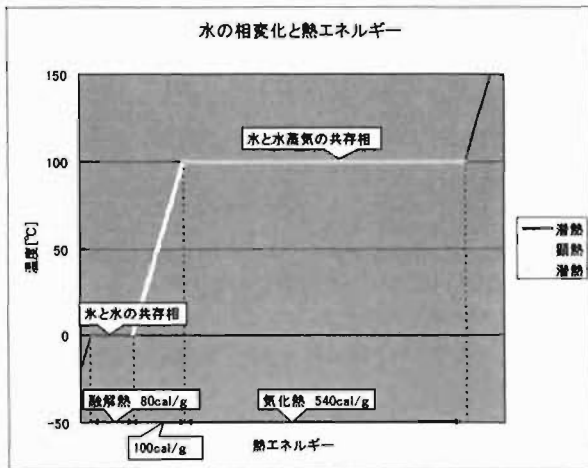


図2 水の相変化と熱エネルギー

氷による消火は、図2で示される氷と水の共存部分における潜熱までも活用しようとするものである。

(イ) 燃焼物体の温度について

燃焼物体の温度をどこまで下げるべきかについて検討する。木材の発火点は400℃～470℃、引火点は200℃～270℃である。ここでは、低く見積もって、発火点を400℃、引火点を200℃とする。接炎してもすぐに再発火するおそれのない200℃以下にすることが望ましいと考える。

(ロ) 燃焼物体の温度降下について

1gの木材が1gの水及び氷に熱エネルギーを与えて、木材の温度を低下げるのにどれくらい必要かを見るために簡単な計算を行う。ここで、木材の比熱は、0.3cal/gK(表2参照 木材の比熱)として計算する。

表2 木材の比熱

材料名	比熱
木材(松)	1.26 kJ/kg・K(=0.3cal/gK)
木材(杉)	1.26 kJ/kg・K(=0.3cal/gK)
木材(檜)	1.26 kJ/kg・K(=0.3cal/gK)

実際、火炎を形成して燃焼している木材自体の温度は分からないが、木材の発火点以上、火炎の温度約800℃以下と考え、大きく見積もって、800℃とする。

ここで、20℃、1gの水がすべて気化するまでに必要な熱エネルギーは、620cal、0℃、1gの氷がすべて気化するまでに必要な熱エネルギーは、720calである。気化した水は、温度上昇に関係ないとする、1gの木材を800℃から200℃にまで下げるのに必要な熱エネルギーは、180calである。(図3参照)

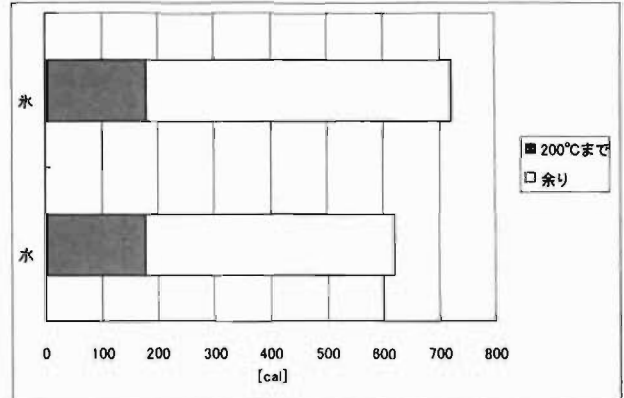


図3 氷と水の比較図

実際の燃焼物体の温度は、一様ではなく内部は表面に対して温度が下がっていることなど現実的なことを考えれば、より少ない熱エネルギーで200℃以下にできるとも考えられる。

冷却効果による消火は、水と氷について差はないと思うが、余った部分が付着等の効果をもたらすと考えると、冷却と付着の相乗効果によってどのように消火されていくのか検討する必要がある。

イ 氷の付着による効果について

(イ) 持続的な冷却効果について

低い温度のものが高温のものに接触すれば温度の降下率は大きくなると考えられるが、居室内に付着した氷が持続的に物体の温度を下げられるかを検討する必要がある。

(ロ) 遮蔽効果について

高温の燃焼物体からの可燃性ガスの発生を抑えるため、氷を燃焼物体に付着させ、可燃性ガスの発生を抑えると共に酸素との接触をさえぎり、燃焼の連鎖反応をおさえ消火していくと考えられる。室内が延焼している中で付着した氷の成長過程、付着の持続性を検討していく必要がある。

(2)放射された氷からの検討

建物火災の場合、開口部からの空気の流入及び流出の流れが存在する。今回の装置での氷の放射状態は水という噴霧放水であるので、空気に流れて影響されると考えられる。

また、氷が燃焼物体に到達するまでに融解することも考えられるので有効な放射距離を検討する必要がある。

以上のことから、平成12年に行った消火剤に関する実験設定を基本に、上記の検討事項に対して、必要な測定装置を加え、現在の最大放射量8kg/分での評価を行う。

5 実験

(1) 消火効果に関する実験

ア 実験概要

移動実験室内に消火対象物を設置し、氷の粒子径、氷の含水率（氷と水の混合率）を変えた複数の実験により、消火効果について検証する。

イ 実験設定

実験設定は、移動実験室（縦 3.6m×横 3.3m×高さ 2.15m で壁、床、天井は、ALC にステンレス板を貼り付け、柱は鉄骨造である。）を使用し、図 4 から図 6 に示すように測定点を設けた。

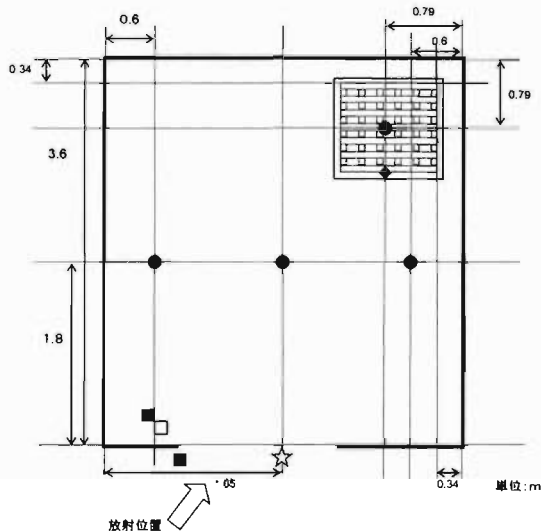


図 4 移動実験室（平面図）

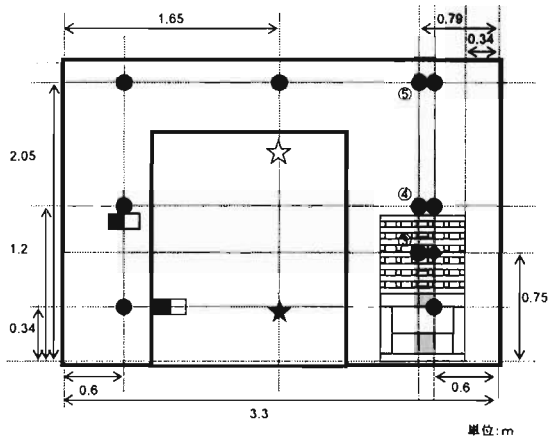


図 5 移動実験室（立面図）

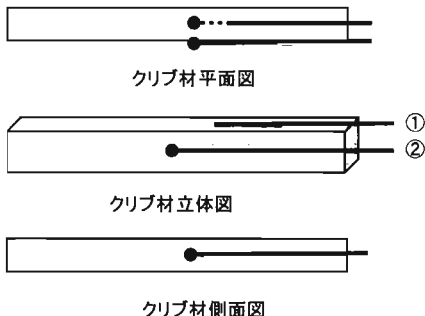


図 6 クリブ材に設置した熱電対

表 3 測定機器

記号	測定項目	測定機器
●	温度計（熱電対）	シーズ型 K 熱電対
□	熱流束計	メドサーム社製
■	熱流束計（輻射熱）	メドサーム社製
☆	圧力計	ミネベア社製
★	風速計	日本カノマックス社製
◻	重量計	

※ 記録は、各測定機器の電圧出力をデータ記録機（江藤電気社製 CADAC21 モデル 9201）により記録した。

イ 測定点について

(ア) 風速計・圧力計

この測定器は、区画内の火災における開口部からの空気の流入、熱気流の流出の状況を計測する。その中で、氷のクリブへの到達状況を確認する。

(イ) クリブ材の内部、木材表面の温度計の設置

この測定器の設置は、燃焼物体の温度が消火による温度変化を確認する。図 6 のようにクリブ材の中心部（①）、クリブ材の表面（②）に熱電対を設置し、このグリブ材を図 4、5 の◆の位置に設置した。

(ウ) 重量計

クリブが燃焼し始めると重量が軽くなっていく、そこでクリブの下に重量計を置き、水及び氷の付着効果、到達の度合等を重量変化により検討する。

(エ) 熱流束計

設定した空間の熱量が、各実験に差がないかを確認する。

ウ 実験手順

各実験において、5 m の放射距離を確認した後、以下の手順で実施する。

時間経過	行動	内容
0 : 00	着火	クリブを燃焼させる。
3 : 00	放射開始	クリブ側面に放射する。
3 : 15	放射停止	
3 : 20	放射開始	消炎するまで継続して放射する。
X : XX	放射停止	

エ 放射条件及び消火対象物の組み合わせ

実験No.	消火 クリブ	放射条件		
		放射量（氷+水）	粒子径	含水率
実験 I-1	2 単位	7.1 kg/分	1.0mm	0 %
実験 I-2	2 単位	7.3 kg/分		
実験 I-3	1 単位	7.2 kg/分		
実験 I-4	2 単位	9.1 kg/分		20 %
実験 I-5	2 単位	13 kg/分		
実験 I-6	2 単位	6.0 L/分		水

※含水率 = (水の質量 / (水の質量 + 氷の質量))

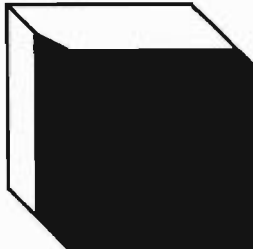
※ 2 単位（1 単位）とは、2 単位クリブ（1 単位クリブ）を示し、「消火器の技術上の規格を定める省令」（昭和 39 年 9 月 17 日自治省令第 27 号）第 3 条に規定された第 1 模型（第 2 模型）である。

カ 測定結果

(7) 実験 I-1 (2単位・粒子径 0.2mm・含水率 0%)

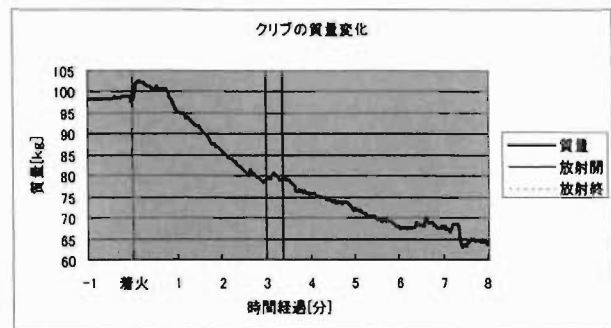
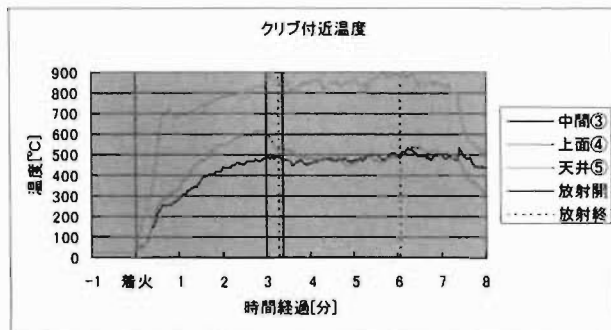
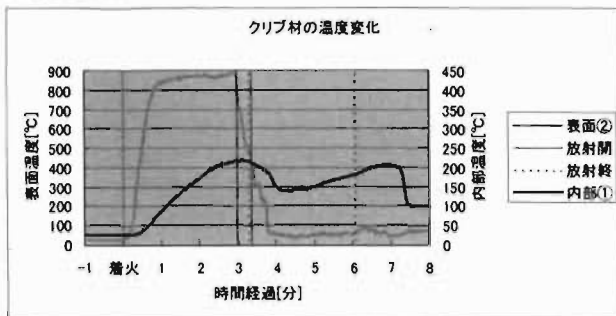
① 消火状況及び付着状況 (目視確認)

氷が到達した部分の有炎現象は消滅したが、下図の白い部分の有炎現象は継続した。放射中に氷の付着は確認できなかった。



左図は、移動実験室開口部から見たクリブの状況
● は、有炎現象が消滅した部分を示す。

② 測定結果



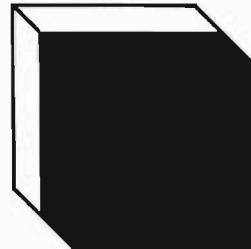
③ 結果の考察

氷は、クリブ付近の温度状況から、クリブ上面の温度降下が見られるが、中央、天井面の温度降下が見られないことから、クリブ前面の一部にしか届いていない。質量の変化状況からも、質量の大きな上昇が見られず、あまり到達・付着していないことが考えられる。クリブ材内部の温度は2回目の放射後に下降している。

(4) 実験 I-2 (2単位・粒子径 1.0mm・含水率 0%)

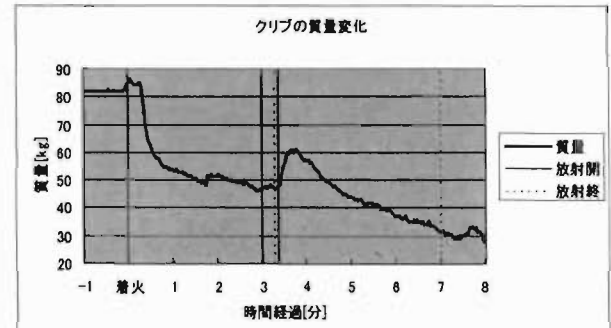
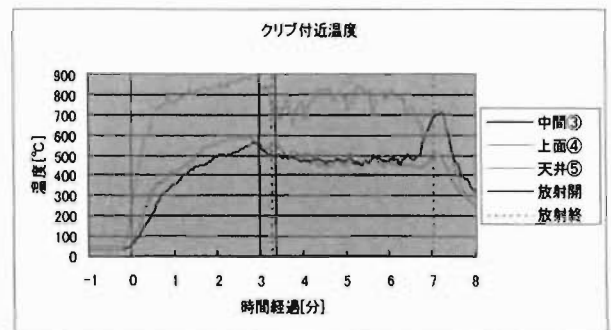
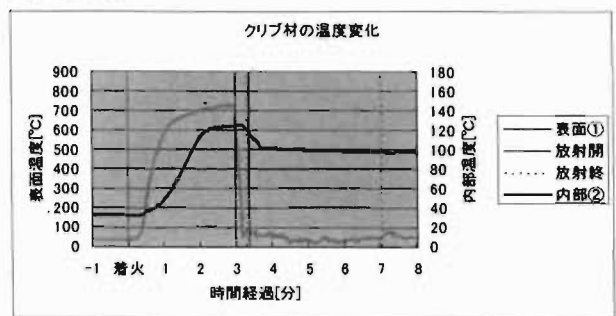
① 消火状況及び付着状況 (目視確認)

氷が到達した部分の有炎現象は消滅したが、下図の白い部分の有炎現象は継続した。放射中に氷の付着は確認できなかった。



左図は、移動実験室開口部から見たクリブの状況
● は、有炎現象が消滅した部分を示す。

② 測定結果



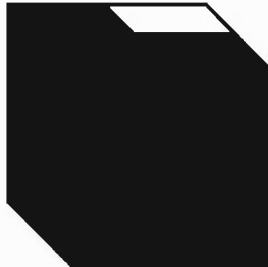
③ 結果の考察

氷は、クリブ付近の温度状況から、クリブ上面、中央、天井面の温度降下が見られ、クリブ前面の一部にしか届いてないが、実験 I-1 よりもクリブの奥に到達していると考えられる。質量の変化状況から、質量の上昇が見られることから、氷が到達していることが考えられる。クリブ材内部の温度は、2回目放射後に下降している。

(7) 実験 I-3 (1 単位・粒子径 1.0 mm・含水率 0%)

① 消火状況及び付着状況 (目視確認)

氷が到達した部分の有炎現象は消滅したが、下図の白い部分の有炎現象は継続した。放射中に氷の付着は確認できなかった。



左図は、移動実験室開口部から見たクリブの状況
●は、有炎現象が消滅した部分を示す。

(8) 実験 I-4 (2 単位・粒子径 1.0 mm・含水率 20%)

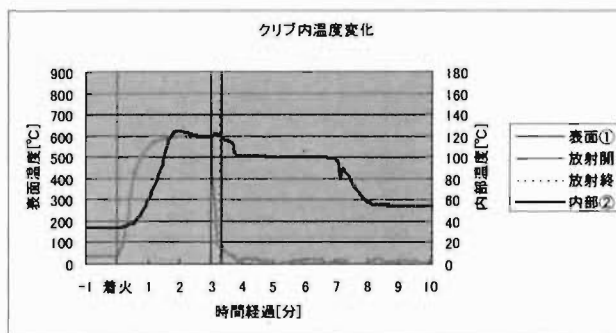
① 消火状況及び付着状況 (目視確認)

氷が到達した部分の有炎現象は消滅したが、下図の白い部分の有炎現象は継続した。放射中に氷の付着は確認できなかった。

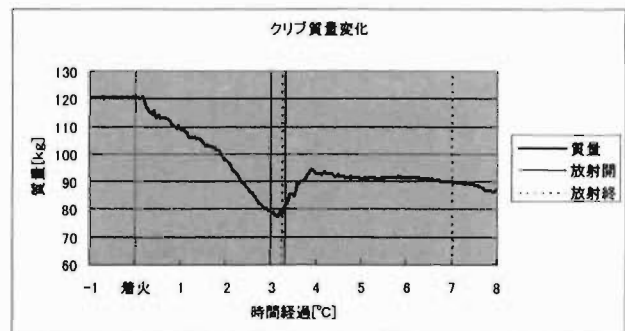
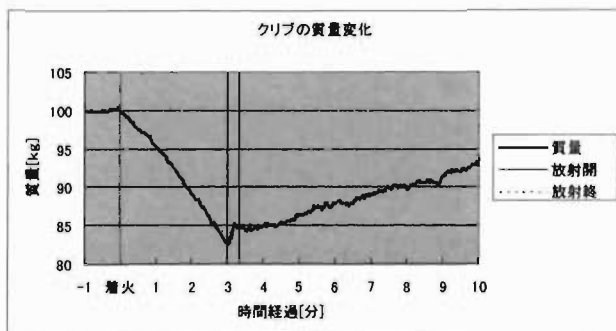
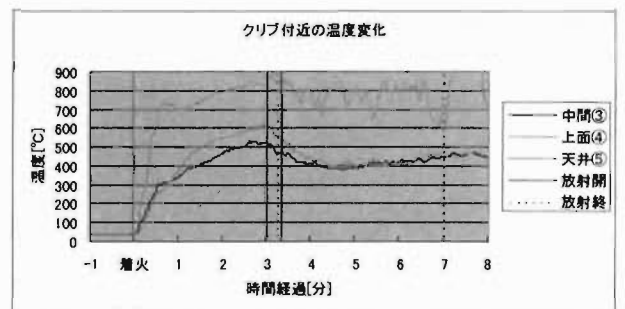
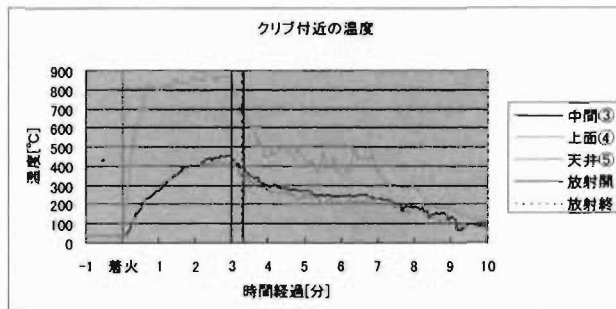
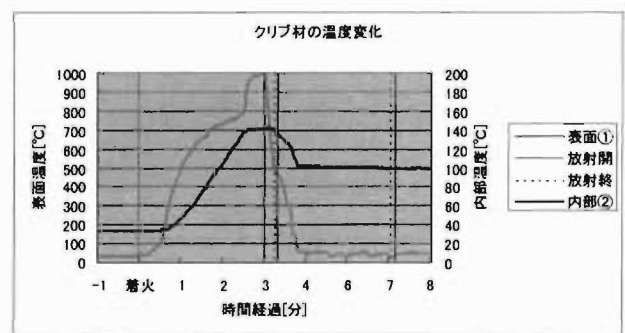


左図は、移動実験室開口部から見たクリブの状況
●は、有炎現象が消滅した部分を示す。

② 測定結果



② 測定結果



③ 結果の考察

氷は、クリブ付近の温度状況から、クリブ上面、中央、天井面の温度降下が見られることからクリブの全体が消火に向かっている。質量の変化状況から、放射終了まで質量上昇が継続して見られることから、氷が到達していることが考えられる。クリブ材内部の温度は、2回目の放射後に降下している。

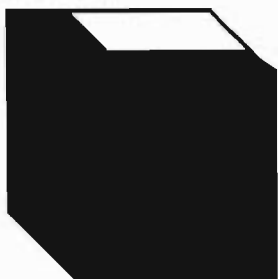
③ 結果の考察

氷は、クリブ付近の温度状況から、クリブ上面、中央、天井面の温度降下が見られることからクリブの前面の一部には届いている。質量の変化状況から、質量上昇が見られ、氷が到達していることが考えられる。クリブ材内部の温度は、1回目の放射で降下し始めている。

(イ)実験 I-5 (2単位・粒子径 1.0mm・含水率 50%)

①消火状況及び付着状況 (目視確認)

氷が到達した部分の有炎現象は消滅したが、下図の白い部分の有炎現象は継続した。放射時に氷の付着は確認できなかった。

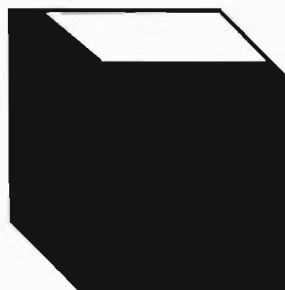


左図は、移動実験室開口部から見たクリブの状況
●は、有炎現象が消滅した部分を示す。

(カ)実験 I-6 (2単位・毎分7L)

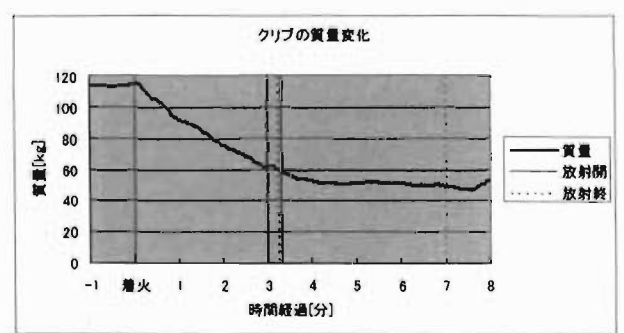
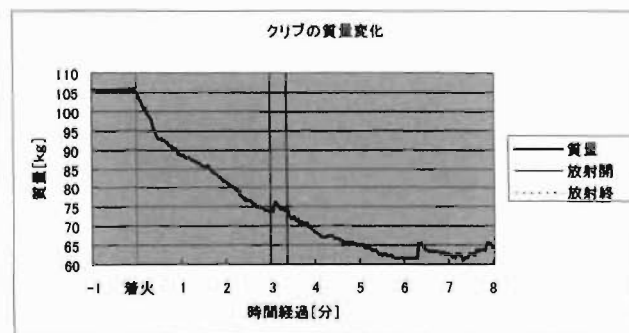
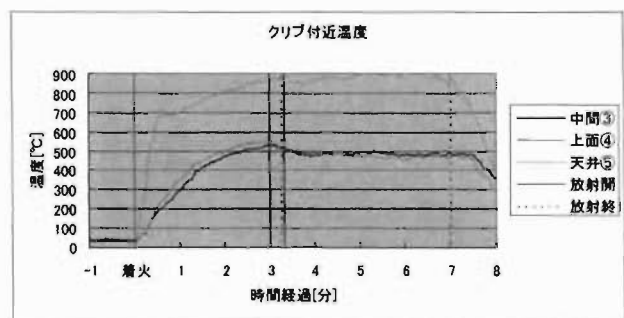
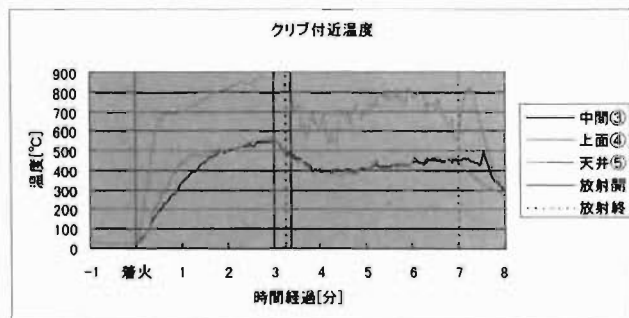
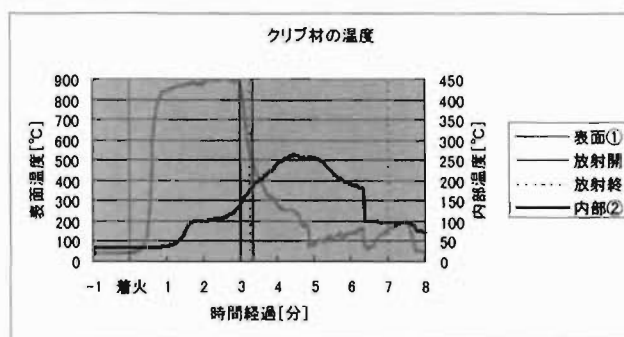
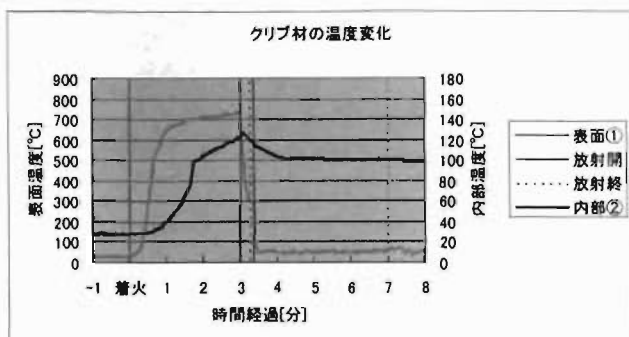
①消火状況及び付着状況 (目視確認)

氷が到達した部分の有炎現象は消滅したが、下図の白い部分の有炎現象は継続した。



左図は、移動実験室開口部から見たクリブの状況
●は、有炎現象が消滅した部分を示す。

②測定結果



③結果の考察

氷は、クリブ付近の温度状況から、クリブ上面、中央、天井面の温度降下が見られることからクリブの約半分には届いている。質量の変化状況から、質量上昇が見られる。クリブ材内部の温度は、1回目の放射で降下し始めており、急激に変化している。

③結果の考察

水は、クリブ付近の温度状況から、天井面の温度降下が見られず、中央、クリブ上面の温度降下少ししか見られないことからクリブの一部にしか届いていない。質量の変化状況から、大きな質量の上昇が見られず、燃焼が継続している。

この水による消火は、水道水によるストレート放水によ

るものである。

(2) 付着効果に関する実験

ア 実験概要

移動実験室内にクリブ、ベニヤ板を設置し、氷の含水率を変えた2回の実験により付着効果について検証する。

イ 実験設定

実験設定は、図7～9のように2単位クリブ、ベニヤ板を設定した。

(ア) 測定機器の設置

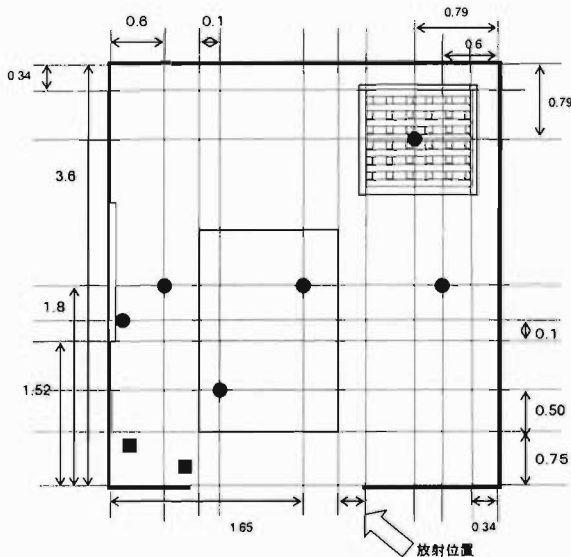


図7 移動実験室（平面図）

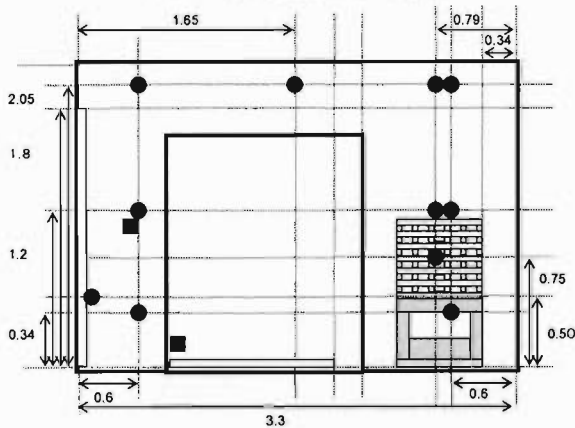


図8 移動実験室（立面図）

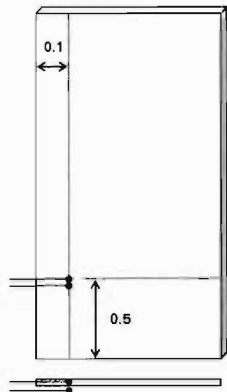


図9 ベニヤ板に設置した熱電対

表5 測定機器

記号	測定項目	測定機器
●	温度計（熱電対）	シーstype K 熱電対
□	熱流束計	メドサーム社製
■	熱流束計（輻射熱）	メドサーム社製

※ 記録は、各測定機器の電圧出力をデータ記録機（江藤電気社製 CADAC21 モデル 9201）により、記録した。

(イ) ベニヤ板の設置状況

ベニヤ板は、厚さ10mmのものを使用し、移動実験室内床面壁面に設定した。

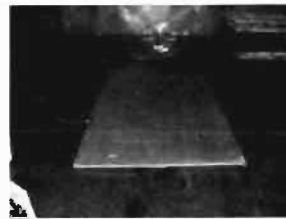


写真7 床面

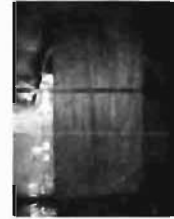


写真8 壁面

ウ 測定点について

(ア) ベニヤ板の内部、ベニヤ表面の温度計の設置

この測定器の設置は、ベニヤ板の中間にドリルで穴を開け熱電対を挿入（図9参照）し、氷の放射によるベニヤ板の温度変化を確認する。

(イ) 熱流束計

設定したベニヤ板付近の熱流束を確認する。

エ 実験手順

各実験において以下の手順で実施する。

時間経過	行動	内容
0:00	着火	クリブを燃焼させる。
1:00	放射開始	床面に放射を開始する。
3:00	放射開始	壁面に放射を開始する。
5:00	放射停止	

オ 放射条件及び消火対象物の組み合わせ

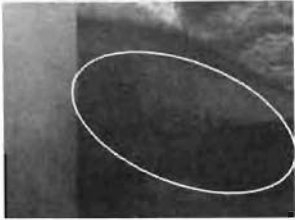
実験No.	放射対象	放射条件		
		放射量	粒子径	含水率
実験 II-1	ベニヤ	8.6 kg/分	1.0mm	0%
実験 II-2	ベニヤ	18 kg/分	1.0mm	50%

カ 実験結果

(7) 実験Ⅱ-1 (粒子径 1.0 mm・含水率 0%)

① 堆積状況 (床面)

固体のまま床面に堆積した。

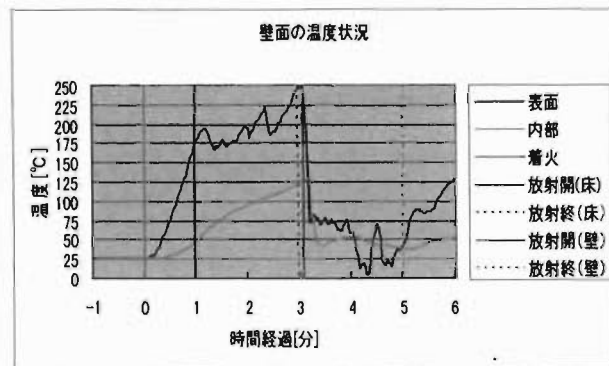
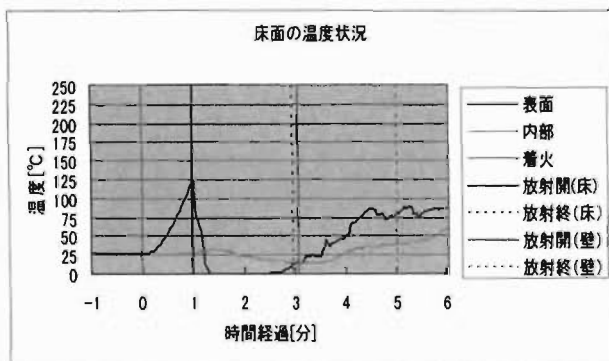


② 付着状況 (壁面)

付着は確認できたが、自重でしばらくすると落下した。



③ 測定結果



④ 結果の考察

床面への放射により、ベニヤ板の温度は、0℃近くまで下がっており、内部温度についても放射中降下し続けているが、放射終了後、表面も内部も温度上昇がはじまる。

壁面への放射は、ベニヤ板表面も内部も温度降下が急激にはじまる。壁面表面の0℃近くを示しているのは付着しているためでありその後の上昇は、氷の落下を示しているものと考えられる。

(4) 実験Ⅱ-2 (粒子径 1.0 mm・含水率 5.0%)

① 堆積状況 (床面)

堆積は確認できなかった。

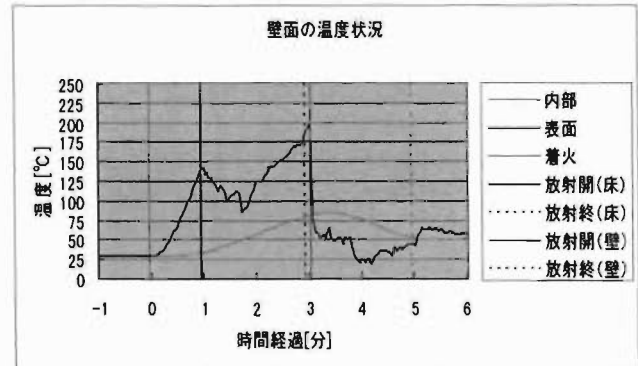
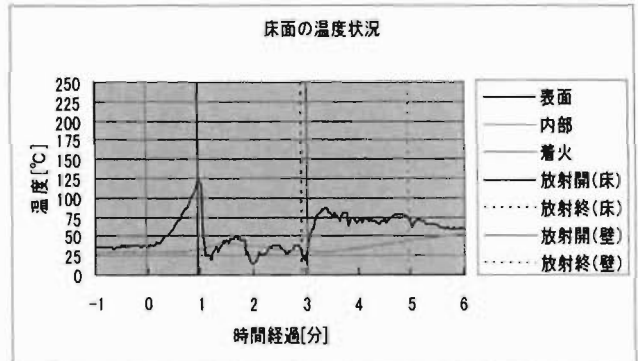


② 付着状況 (壁面)

付着は確認できなかった。



③ 測定結果



④ 結果の考察

水を付着させた氷は、床面への堆積、壁面への付着を確認することができなかった。

6 考察

(1) 氷による冷却効果について

消火効果の一連の実験から、氷が届いた部分については、有炎現象が消滅しているが、届かなかった部分は、継続して燃焼していた。各々のクリブ材の内部温度を比較すると氷のみの放射では、内部温度の降下を確認できるまでに時間を要したものがあつたが、水を含んだ放射については、氷のみの放射より早く、内部の温度降下が確認できた。とりわけ、実験 I - 5 については、第 1 回目の放射中に急激に内部の温度降下が始まっている。

この実験からでは、氷のみより、水を含ませた方が内部への冷却効果が大きいと考えられる。

(2) 氷の付着による効果について

付着効果の一連の実験から、高温環境下によっても、放射方法や放射時間を維持すれば付着を維持できることが確認された。付着した氷は、自重によって落下している状況も確認できた。

実際、居室の火災を消火していく場合は、一箇所に向け続けることはしないので、大量の氷を放射することにより、付着の成長を早める必要がある。しかし、付着量によっては、自重により落下する可能性が高くなる。

また、水を付着させた氷の場合において、付着・堆積が認められなかったことから、放射角度などの放射方法によって付着状況も変わるが、冷却効果と付着効果が相反する位置付けになることが考えられる。

(3) 放射された氷について

消火効果の実験から、粒子径が小さい場合、クリブへの到達範囲が少ないなど、到達距離に影響すると考えられる。

また、0.2mm より 1.0mm のほうが到達距離が長い。

(4) 消火効率について

現行の放射量においては、2 単位クリブの消火に至らず、消火効率を考えることはできない。

現在の状況では、燃焼物に放射した時の付着が目視確認できないので、氷による付着効果と冷却効果が相乗効果としてどのような消火効率をもたらすかを見極めることができない。この効果を見極めるためには、2 単位クリブを水と同様の速さで消す位の氷の量を出すことにおいて消火効率を検討する必要がある。

また、付着効果を考慮する場合は、放射形状にも影響されると考えられるのでノズル等も踏まえて検討する必要がある。

7 仕様の検討

今回の実験から、氷を建物火災の消火に用いた場合どのような仕様が考えられるか。

(1) 放射量について

150kg/分の放射量を基準とし、どれだけ下げられるか検討していく必要がある。東京消防庁で使用されている Fog Gun の水量が 150ℓ/分～200ℓ/分であり、現在の雪氷用ノズルだと噴霧放水形状（円錐型）であり、現在使用している放水器具（Fog Gun）の流量程度にあわせておく必要がある。

(2) 粒子径について

今回の実験結果では、1.0mm 程度とする。粒子径が小さければ区画火災の熱気流に抵抗して飛ぶことになり、到達距離が短くなり、到達するまでに氷粒子が水になる確率が大きくなる。

また、粒子径が大きければ、運動量が増し、到達距離が長くなるが、氷表面が融けず壁で跳ね返ることも考えられる。実験は、0.2mm と 1.0mm で行ったが、氷の融解現象、到達距離を考えれば、1.0mm 以上の大きさについても検討する必要がある。

(3) 含水率について

0%とする。氷に水を付着させることにより、水と氷が共存していれば約 0℃ と考えることができるが、エネルギーを使って 0℃ 以下にしたものを自ら上昇させる必要はない。

また、含水率が 0% のほうが壁面への付着、床面への堆積が確認できたが、水を含ませた場合は壁面への付着、床面への堆積が確認できなかった。

(4) ノズルについて

現在のノズルでは、含水しない場合は筒状であり、含水する場合は筒状の先に含水する機械を取り付けるしくみになっている。

理想としては、ストレート放水的な放射後広がりを持たないもの（局所的に雪氷を付着させる為）、現状タイプの噴霧放水的なもの（広範囲を消火する為）、自衛噴霧が出来るような放射形状のもの（隊員の活動支援）を兼ね備えたい。

(5) ホースについて

ホースの中で、氷は螺旋状に輸送されている。輸送量とホース径から消火活動における操作性も考慮にいれ検討する必要がある。（写真 6 参照）

8 平成 18 年度への課題

氷の放射量を増量した消火実験により消火効果を見極める。

9 災害現場での氷の活用方策についての検討

(1) 火災への活用

野積みになされている大量のタイヤなどが燃えた場合、氷によって燃焼物体自体を覆うことにより、窒息・冷却効果により消火する。このためには、放射距離、放射量を検討しなければならない。

林野火災では、樹木等に氷を吹付けることによる冷却効果によって延焼拡大をおさえることが考えられる。

(2) その他の災害での活用

ア N災害での活用（中性子の遮蔽）

中性子がエネルギーを失う過程は、原子との弾性散乱が主であり、低原子番号の物質ほど減速材に適している。

十分減速された結果生じた中性子は、原子核との核反応により容易に吸収されます。中性子が吸収されると γ 線が放出されることがあるので、これをさらに比重の大きい材料を用いて吸収し中性子を遮蔽することができる。

そこで、低原子番号である水素が含まれる水を使用して中性子を遮蔽できるものが、第3方面本部の消防救助機動部隊に配置されている特殊災害対策車である。今回の雪氷消火システムを使用することにより、水が固体となることから、壁や開口部に吹き付けることにより、建物内部から放射される中性子を遮蔽することができる。また、鉛板などに吹き付けることにより、中性子の吸収過程で発生する γ 線を遮蔽することができ、簡易的な遮蔽物をつくることができる。

イ 隣棟への延焼阻止

氷による直接の消火効果だけではなく、隣棟への延焼拡大防止のために事前に壁面に吹き付け、軒裏などの火の粉が侵入する場所を事前に固体であることを利用して塞ぐことにより延焼拡大を阻止する。

ウ ガソリン等の拡散防止

タンクローリーからのガソリンの流出時に、氷により土手を作り流出拡大を防ぐ。

氷粒子で土手をつくれれば、保水作用により、ガソリン等の流出物を吸収することができる。問題は、氷にガソリン等の可燃物を含ませた場合に最後は、どのような処理するか、夏場の暑い時期、流出範囲が広範囲にわたる場合など解けて流出拡大することが考えられる。また、どれくらいの量を積みばどれくらいもつのかなど検討しなければならない。

エ 救急現場での活用

多数傷病者の発生した災害現状においての傷病者への冷却剤として使用することができる。

尼崎で発生した列車横転事故などの災害現場では、近くの氷屋が氷を提供した事例もあり、災害現場で氷を製造し活用できる。

また、雪氷消火システムでは、粒子径数ミリメートルのものを作ることができ、袋に詰めれば、傷病者の患部の形状にあった冷却袋ができ、補助的な固定用具としても使用できると考えられる。

参考文献

(1) 第2種（一般）放射線取扱主任者講習テキスト

(財)原子力安全技術センター

(2) 改訂版建築火災安全工学入門 日本建築センター 田中晔義

(3) 近代消防 '05年6月臨時増刊号 近代消防社 P196～P201

(4) 火災便覧 新版 日本火災学会編

(5) 渡邊茂男、斉藤仁、篠原雅幸、赤坂浩、坂本利行 消防活動における消火剤の有効性に関する研究、消防科学研究所報、38号 P1～P5

Inspection Verification of Firefighting System Using Snow and Ice (First Report)

Koichi TAMAKOSHI*, Akihiko IIDA*, Shohei, NEMOTO*, Youichi SUGAWARA**

Abstract

In this verification, in order to verify the fire extinguishing efficiency of using ice for firefighting, we carried out fire extinguishing experiments with altered discharging conditions. As a result, we confirmed that the diameter of ice particles can affect the discharging circuit, and the moisture content (ice with water) has a cooling effect and an adhesive effect, and even in a high temperature environment, the ice will adhere to walls depending on discharging conditions of the ice.