

水損防止型スプリンクラーの研究開発

Study and Development of the Sprinkler System which Minimizes Water Damage

脇 賢**
 渡 邊 久 夫*
 佐々木 一 治***
 下 重 美佐男*
 大 原 義 雄*

概 要

消火能力の高さと自然環境への安全性から、スプリンクラー設備に対する重要性が高まっている。しかし、スプリンクラー設備は一旦作動すると、人為的に制御弁等を操作しない限り放水を停止することができない。また、建物内の濃煙熱気等により、制御弁の位置を探すことが困難な場合が少なくない。そのため、消火後も放水を継続し、下階等への水損被害が火災の被害を上回ることが懸念されている。

そこで、火災室内の温度変化をとらえ、高温で通水路を自動開放し、低温で自動閉鎖する水損防止型スプリンクラー設備の開発を行っている。本報では、試作機の構成と実験結果についてその概要を紹介する。

Because of its effectiveness in extinguishing fires and for environmental safety considerations, sprinkler systems are gaining its importance increasingly. However, sprinkler systems have a disadvantage in that once they are actuated, the water discharge cannot be stopped until the control valves are manually closed.

There is great concern that the water, which continues to flow even after the fire is out, may cause water damage to floors underneath, sometimes more severely than the room of the fire.

With this in mind, we are developing a sprinkler system which minimizes water damage. It detects changes in the room temperature, and opens the water control valve automatically at a high temperature, and closes it automatically when the temperature goes down to a certain point. This report describes the design of the sprinkler prototype, and the result of the experiment.

1 はじめに

現在、一般のビル等に多く設置されている閉鎖型スプリンクラー消火設備（以下「スプリンクラー」という）は、火災室内の温度上昇をとらえて放水を開始するため消火時の奏効事例から見ても信頼性が大変高い。また、消火には水を使用しているため、人体に安全で自然環境に優しいという特長がある。しかし、その反面一旦放水を開始すると、人為的に制御弁等を操作しない限り放水を停止することができないため、建物及び収容物に対する水損被害の拡大が問題となることがある。そのため、消火後は速やかに放水を停止できる、スプリンクラーの開発が望まれている。

そこで、当研究室では水損被害を少しでも軽減するため、閉鎖型スプリンクラーヘッド（以下「ヘッド」という）直前に制御装置を取付け、消火後は自動で放水を停止し、万一再燃した場合でも放水と停止を繰り返すス

プリンクラーの研究開発に着手した。以下、製作した試作機の概要等について紹介する。

2 試作機の概要

(1) 原 理

既存のヘッドは、内部に設置してあるヒューズブルリンク又はガラスバルブ等の感熱体（以下「感熱体」という）が火熱により一定温度に達すると、放水口を開放させるために破壊又は変形を生じ、放水口が開放される機構である。

今回試作した装置は、ヘッドの直前に制御装置を取付け、出火から消火までの室内温度変化を形状記憶合金でとらえて制御するものである。

形状記憶合金は、高温で形状を記憶させ、低温で変形させても、加熱すると元の記憶した形状に戻る性質がある。そのためバイメタルのように温度センサーとして使用することができる。

バイメタルは、熱膨張係数の違う金属材料を張り合

*第三研究室 **高輪消防署 ***蒲田消防署

わせ、周りの温度が変化すると熱膨張率の差からたわみ（変形）が生じることを利用して、温度センサーとして使用されている。

バイメタルと形状記憶合金の最大の違いは、温度変化時の変位量と変位時に発生する発生力にある。バイメタルは、金属の熱膨張を利用しているため、温度変化に比例して直線的に変位する。しかし、温度の変化によって発生力は見られない。これに対し形状記憶合金は、大きな発生力（回復力）が得られるため、バイアスバネなどと組み合わせることにより、温度センサー+アクチュエータとして使用することができる。

今回の試作機では、形状記憶合金にコイルバネと水圧を組み合わせ、温度センサー+アクチュエータとして使用した。

(2) 形状記憶合金について

ア 形状記憶合金の種類

形状記憶合金は、高温で形状を記憶させ低温で変形を与えても、加熱することにより変形前の形状に戻る金属である。代表的な形状記憶合金には、チタン・ニッケル合金（以下「Ti-Ni 合金」という）や、銅・鉛・アルミニウム合金などがある。

(表 1 参照)

表 1 形状記憶効果を示す合金

元素系	金属名
Ti-Ni	チタン・ニッケル
Ni-Al	ニッケル・アルミニウム
Ag-Cd	銀・カドミウム
Cu-Al-Ni	銅・アルミニウム・ニッケル
Cu-Au-Zn	銅・金・亜鉛
Cu-Sn	銅・すず
Cu-Zn	銅・亜鉛
In-Tl	インジウム・タリウム
In-Cd	インジウム・カドミウム
Ti-Ni-Cu	チタン・ニッケル・銅
Ti-Ni-Fe	チタン・ニッケル・鉄
Cu-Zn-Al	銅・亜鉛・アルミニウム

イ Ti-Ni 合金の特色

この中でTi-Ni 合金は、他の合金に比べ機械的強度が大きいため、形状回復時の発生力が大きく、また、耐熱性が良く薬品やガス類に対し優れた耐食性

がある。更に、耐久性に優れているため何度でも繰り返し動作させることができる。しかし、加工性が悪く高価であるなどの欠点もある。

Ti-Ni合金は、復元可能な変形量が引っ張りひずみで10%に達することがある。この数値は一般金属材料の数10倍から100倍である。

低温では見かけ上柔らかくて変形しやすく、高温では硬く弾性に富んだ性質を示す。

ウ 形状回復の原理

形状記憶合金が形状を回復する現象には、高温状態と低温状態時の結晶構造が変化する「変態」という現象が伴う。変態をおこす温度を変態温度といい、変態には拡散変態と無拡散変態があり、形状記憶合金の変態は無拡散変態である。

この無拡散変態は、原子が連携して移動する場合の変態で、マルテンサイト変態（以後「M変態」という）といわれ、炭素鋼を900℃位までに加熱後急冷（焼入れ）した時に見られる。

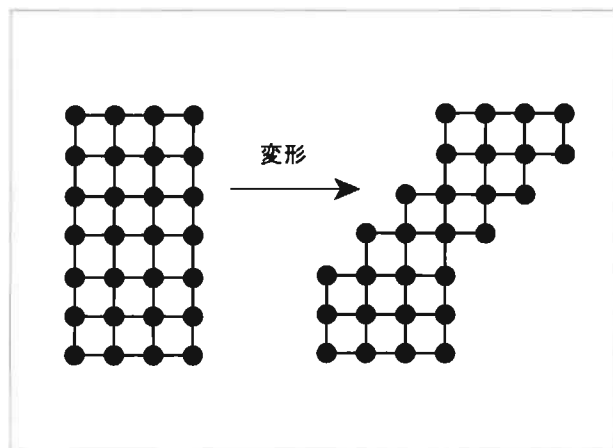


図 1 普通の金属結晶の変形模式図

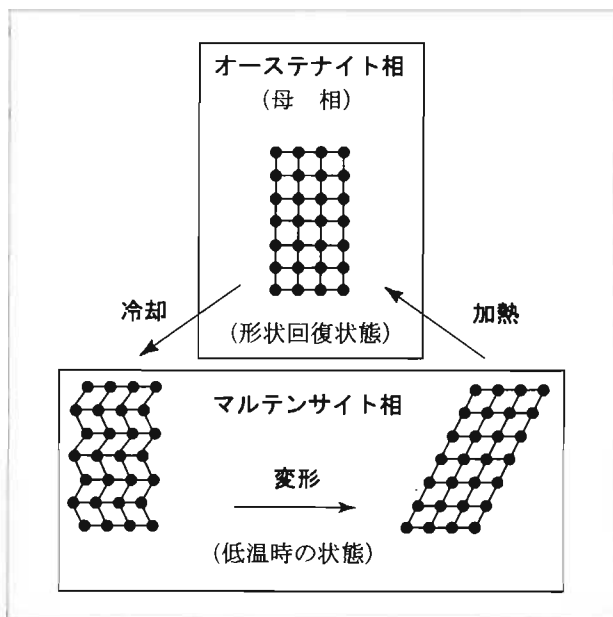


図 2 形状記憶効果の結晶の模式図

通常の金属材料は、外部から力を加えて変形したとき、変形量が少ないうちは力を除いても元の状態に戻る（弾性変形）。しかし、変形量がある一定（弾性限度）以上になると、力を除いても大部分の変形（ひずみ）は元に戻らず半永久的に残留してしまう。そのため、ある一定の力を加えると自由に目的の形に加工することができる。（図1、3参照）

形状記憶合金の場合も通常の金属と同じように、変形力を除いても大部分の変形（ひずみ）は残留する。しかし、その変形（ひずみ）は加熱することにより完全に元の状態（ひずみ0）に戻る。この現象は、変形時に形状記憶合金の原子が連携して移動するために発生する。つまり、形状記憶合金はある形を記憶させると、いろいろな形に変形しても、加熱することにより記憶した形に戻ることができる。

（図2、4参照）

(3) 試作機に使用したTi-Ni合金の成分

ニッケルとチタンの成分比は、原子の数で1：1である。しかし、重量比では比重が違うため45%Ti・55%Niになる。

(4) 試作機の構成

今回試作した装置は、ヘッドの直前に取付けてヘッドからの放水を制御するものであり、既存設備の変更はほとんど必要としない。つまり、現在設置している設備に簡単に取付けて使用することができる。

この装置は、配管取付部、感知部、制御部、ヘッド取付部、散水部（既存ヘッド）から構成される。

（図5参照）

配管取付部は、JIS B0203の管用テーパ雄ネジのうち、ヘッドの呼び15に対応するネジの呼びR $\frac{1}{2}$ にしている。これは、一般に多く設置されている標準ヘッドのうち、1分間の放水量が80ℓ/min以下のヘッドと同じ規格であり、既存のヘッドを取外して試作機を取付けることができる。

感知部及び制御部には、Ti-Ni合金線を温度センサー及びアクチュエータとして使用し、本体カバー内側に放水路を囲む形で円周上に二つに折り返して使用している。

このTi-Ni合金線は、放水路部に設置されているパイロット弁（タペット弁）に掛けてあり、この弁と水圧を組み合わせることにより、主弁を作動させるアクチュエータとしても使用している。

散水部には既存のヘッドを使用し、放水の開始は現行の設備と同じく、ヘッドが作動することにより行われる。

(5) 試作機の外見及び寸法

試作機にヘッドを取付けた外見は、写真1のとおり

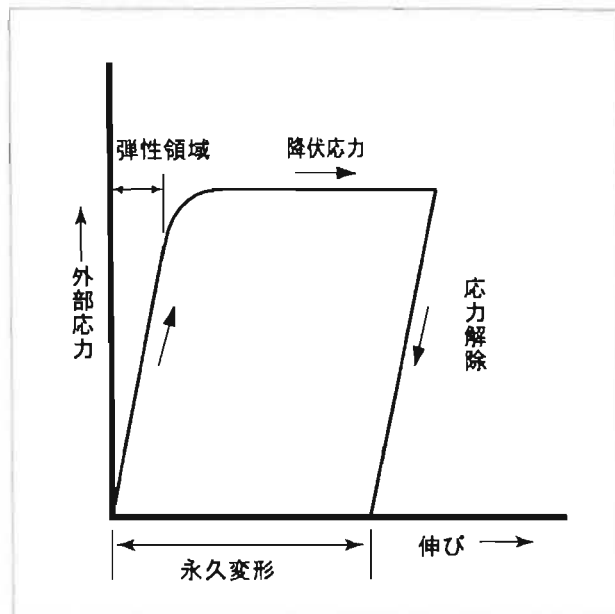


図3 普通の金属の応力—ひずみ線図

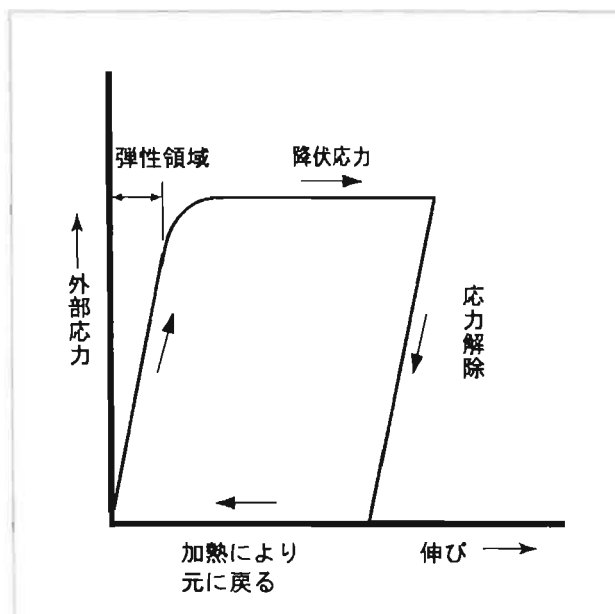


図4 形状記憶合金の応力—ひずみ線図

である。

この装置の外形寸法は図5のとおりであり、最大直径60mm、ヘッドを取付けた状態での高さは79.5mmである。ヘッドを外した状態での高さは51.5mmであり、使用するヘッドによって高さは若干変わる。

本体カバーには、内部に設置してある形状記憶合金線が室内温度をとらえ易くするため、楕円状の穴を円周上にあけてある。

(6) 試作機の仕様

試作機の仕様は表3のとおりであり、本体には加工性を良くするため、黄銅（銅と亜鉛の合金）を使用した。また、取付けるヘッドは標準型又は小区画用ヘッドのうち、標示温度72℃、放水量80ℓ/min以下のもの

表3 試作機の仕様

項目	内容
本体材質	黄銅(銅・亜鉛合金)
温度センサー	Ti-Ni 合金
アクチュエータ	Ti-Ni 合金 パイロット弁 パイロット弁押さえバネ 水圧
主弁材質	本体・黄銅 放水口接触部 ネオプレングムシート
パイロット弁材 質	シリコンゴム性 Oリング
主弁押さえバネ	ステンレス性
パイロット弁 押 さえ バ ネ	ステンレス性

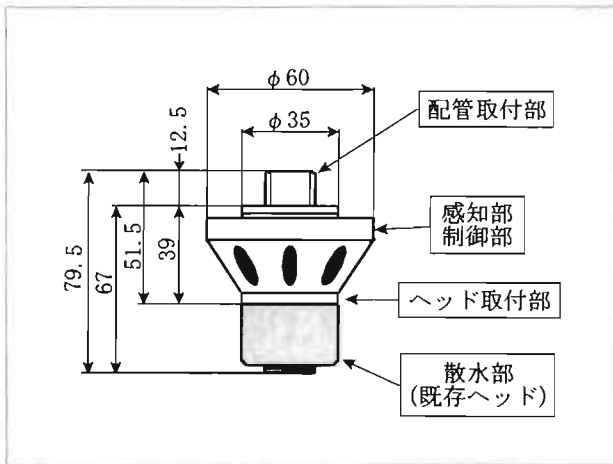


図5 試作機の外形寸法



写真1 試作機の外見

のが取付けられる構造である。

形状記憶合金線と組み合わせて、アクチュエータとしての役割を果たすパイロット弁は、タペット弁方式とした。

(7) 試作機の作動機構 (図6、7、8、9 参照)

常時は、試作機のシリンダー内部及び主弁室に水圧がかかり、主弁押さえバネと共に主弁を下方へ押しつけ放水口を閉鎖している。

しかし、火災により室内の温度が上昇し形状記憶合金線が加熱されると、形状を回復しようと収縮を開始し、水圧及び押さえバネにより、外側へ押されているパイロット弁を内部へ押しさえつける。

パイロット弁が押され水抜き穴が開放されると、主弁室内の水圧が下がり、シリンダー周辺の水圧によって主弁が上方へ押し上げられ放水路を開放し、ヘッドへ通水する。

その後、ヘッドが作動温度に達すると、ヘッドの感

熱体が破壊又は変形し放水を開始する。

形状記憶合金には、形状回復時と形状記憶効果がなくなる時の温度に差(温度ヒステリシス)があるため周囲温度が十分低下するまでパイロット弁を押さえ続ける。

消火により火災室内天井部分の雰囲気温度が低下すると、形状記憶合金線の形状回復力(発動力)が消失するため、水圧とパイロット弁押さえバネの力によりパイロット弁が閉じる。この時、形状記憶合金線は形状回復前の状態に変形される。

パイロット弁が閉じると、主弁室内の水が抜けなくなるため、主弁室内の水圧が高くなり、水圧及び主弁押さえバネの力が、シリンダー周囲の水圧より高くなるため、主弁を下方へ押し下げ、放水路を閉鎖し放水を停止する。

万一再燃した場合は、既にヘッドが開放されているため、室内天井部分の雰囲気温度が試作機の設定温度に達すると、再度放水を開始し消火により室内天井部分の雰囲気温度が低下すると、放水を停止する。この動作は、形状記憶合金の動作寿命が尽きるまで繰り返すことができる。

3 試作機の作動実験

(1) 目的

試作機が、火災発生時の室内天井雰囲気温度変化により作動が可能であるか、検証することを目的とする。

(2) 実験項目

この装置は、火災室内の温度変化をとらえて、スプ

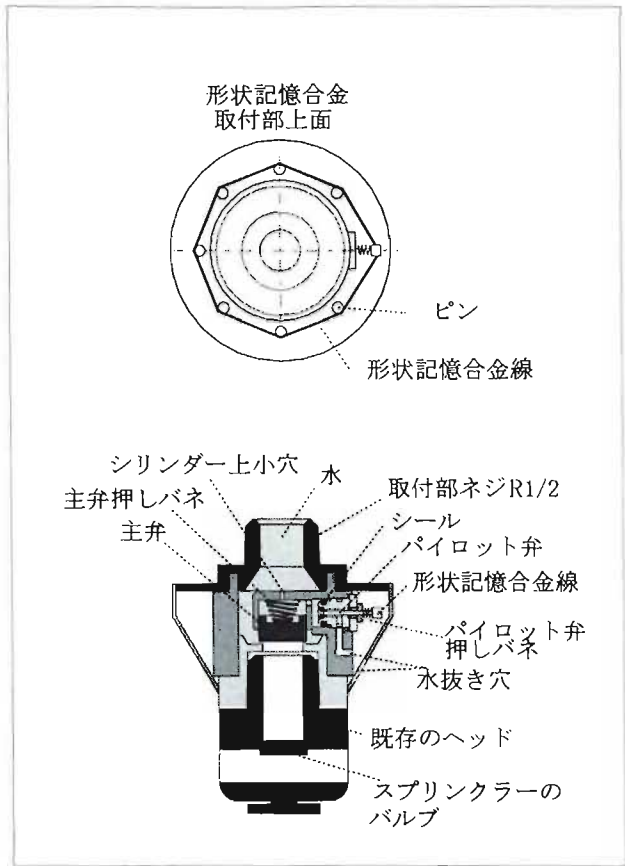


図6 平常時の状況

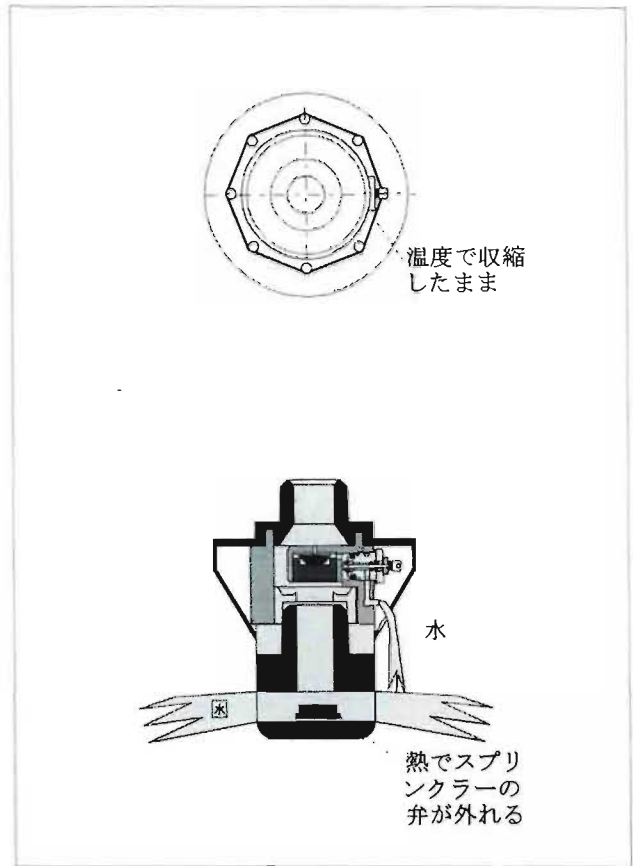


図8 出火放水時の状況

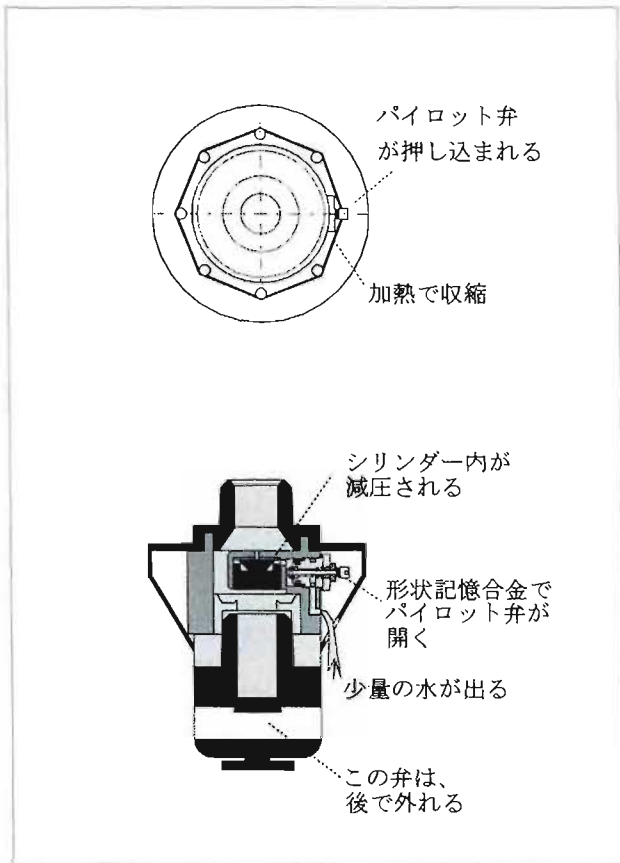


図7 出火時の状況

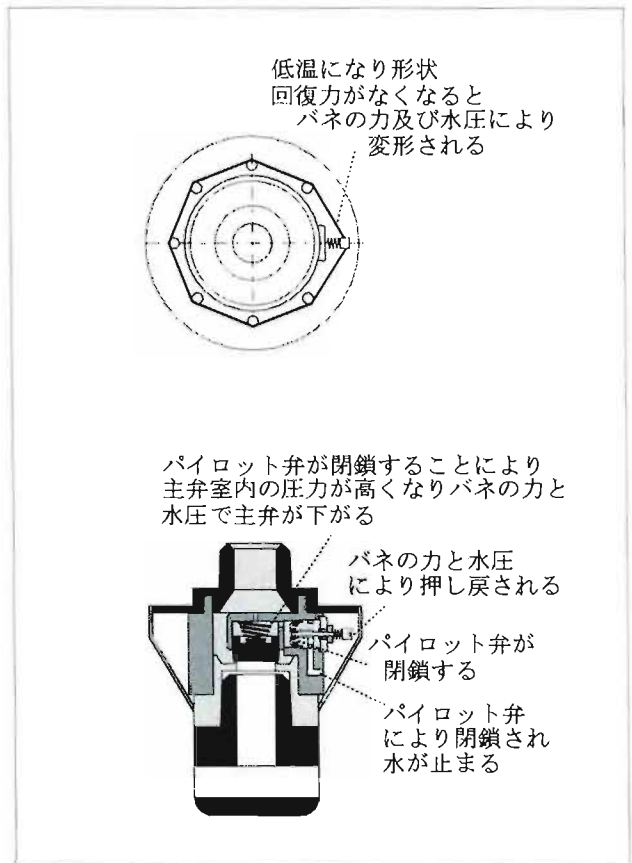


図9 消火完了時の状況

リンクラーからの放水を制御するものである。出火時には既存のヘッドよりも速く作動し、消火後は素早く放水を停止しなければならない。

本実験では、試作機の開放温度を約70℃、閉鎖（放水停止）温度を約40℃に設定し、次の項目について確認した。

- ア 試作機の開放温度
- イ 既存ヘッドの作動温度
- ウ 消火時の閉鎖（放水停止）温度
- エ 停止時の消火状況
- オ 再燃時の前記ア及びウ～エの項目

(3) 実験資器材等

- ア アルメルクロメル（K）熱電対 12本
- イ データロガー（UCAM-70A 共和電業） 1台
- ウ 実験用模擬ハウス（W3.6m×D3.6m×H2.1m） 1基
- エ 燃焼材（杉クリブ W35mm×H30mm×L450mm） 23本
- オ 助燃材（ノルマルヘプタン） 10ml
- カ クリブ用架台（W600mm×D500mm×H250mm） 1基
- キ 燃焼火皿（φ100） 1枚
- ク 水源（研究所内水道水）

(4) 実験方法等

- ア 実験用模擬ハウスの天井中央部分に水道からの配管を設置し、既存ヘッド（小区画用1種72℃50ℓ）付試作機を取付ける。
- イ 実験用模擬ハウス天井に、試作機近傍及び一定間隔で熱電対を設定する。（図10参照）

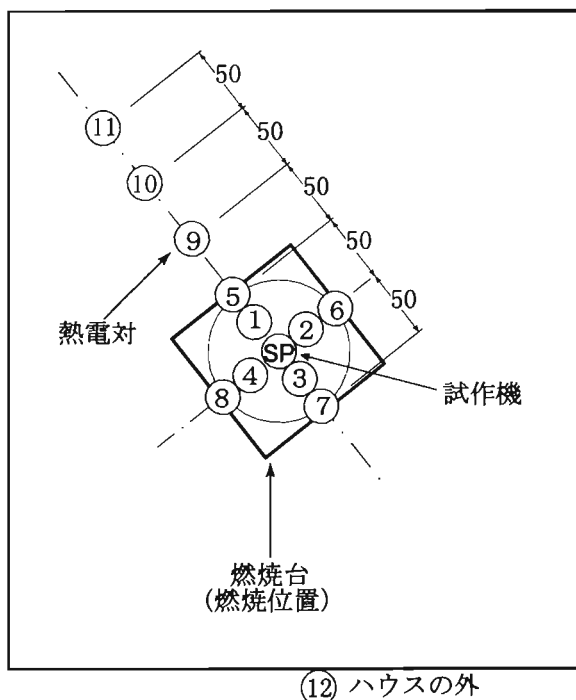


図10 燃焼位置及び測定位置

ウ 試作機設置位置真下に設置したクリブ用架台に、クリブを5本、5本、4本、4本、5本と井桁状に5段積み上げ、その下の火皿にノルマルヘプタン10mlを入れ点火する。

なお、測定時間は点火から消炎までとし、消炎を消火完了とした。

エ 点火から消炎までの、実験用模擬ハウス内天井部分の温度変化を熱電対によりとらえ、データロガーで温度変換してフロッピーディスクに記録した。なお、測定間隔は1秒とした。

オ 初期水圧2.8 kgf/cm²、放水圧力1.7 kgf/cm²とし、放水量は31ℓ/minとした。

4 実験結果

実験結果は表4及びグラフ1、2のとおりである。

- (1) 着火時の試作機開放温度は、設定温度約70℃に対し、測定点4点の最大が73.2℃、最少が57.7℃で平均すると67.9℃であった。
- (2) ヘッド作動温度は、標示温度72℃に対し、最大91.4℃、最少84.3℃、平均86.8℃で作動した。
- (3) 試作機閉鎖（放水停止）温度は設定温度約40℃に対し、最大45.4℃、最少41.7℃、平均43.7℃で停止した。
- (4) 放水停止時の消火状況は、大部分は消炎したもののクリブ中段下側に若干の炎が確認できた。
- (5) 再燃時の作動状況は、1回目の開放温度が平均82.3℃、2回目が平均95.0℃であった。

閉鎖温度は、1回目が平均48.5℃、2回目が平均54.0℃であった。

表4 測定結果 (単位℃)

測定点	①	②	③	④	4点平均
点火前室温	26.0	26.0	26.1	26.6	26.2
開放温度	70.3	70.4	57.7	73.2	67.9
ヘッド作動温度	88.6	86.8	70.4	91.4	84.3
閉鎖温度	44.6	42.9	41.7	45.4	43.7
再開温度	84.7	86.3	77.3	80.8	82.3
再開閉鎖温度	51.3	49.5	44.1	49.1	48.5
再々開放温度	98.7	100.3	93.5	87.4	95.0
再々閉鎖温度	57.8	57.0	49.7	51.4	54.0

(1) 試作機の開放温度について

今回の実験では、試作機の開放温度をヘッドの標示温度より2℃低い約70℃に設定した。

その結果平均約67.9℃で開放し、ヘッドの作動温度が約86.8℃と表示温度より高いため、ヘッド作動時には問題なく放水開始された。

このことから開放時の温度設定は、使用ヘッドの標示温度を基準に、標示温度より2℃低めの設定であれば、ヘッドの作動より試作機の開放が遅れることはないと思われる。

しかし、燃焼材の量や燃焼位置、更には燃焼速度等の変化による測定は行っていないため、完全に限定することはできない。今後の実験により実証していく必要がある。

(2) 閉鎖温度について

試作機の設定閉鎖温度は約40℃であったが、測定結果は平均43.7℃であった。これは、試作機の内部を消火水が通るため、温まっていた試作機が急激に冷やされ、試作機内部の空気が試作機外部の室内温度より早く冷却されて、Ti-Ni合金がその温度をとらえるため、設定温度より高い温度で閉鎖したと思われる。

今後は、合金近傍の温度変化についても測定を実施し、消火時の室内温度変化とTi-Ni合金近傍温度変化を把握し、最適な停止温度の検討を行わなければならない。

(3) 閉鎖時の消火状況について

今回の実験では、完全消火には至らずクリブ中段及び下側に、若干の炎が確認された。

これは、水源として当研究所の水道水を利用したため、ヘッドの規定放水量を得ることができず、散水分布にむらが生じたこと。また、設定温度より若干高い温度で閉鎖したことなどが原因と考えられる。

しかし、設定温度の40℃が必ずしも消火完了時の温度とは限らないため、今後、実験設備の改良等を行い、規定の放水量を得た上で、消火完了時の室内温度を確認する必要がある。

(4) 繰り返し作動について

繰り返しの作動については2回まで確認することができた。それ以降は煙の発生等により中止した。

しかし、繰り返し作動させた場合、各作動温度が高温側にずれていくことが判明した。これは、消火放水により室内の湿度が高くなっている中で、温められた試作機内部を消火水が通るため、急激に冷却されて装置全体に結露が発生するためである。消火後装置を確認すると装置全体に結露が発生していた。

火災発生から消火までの室内温度変化により、スプリンクラーを自動制御できることが確認できた。また、再燃に伴う繰り返し動作することも確認できた。しかし、その反面、放水停止時の設定温度及び形状記憶合金線に発生する結露防止対策等が必要であることも判明した。

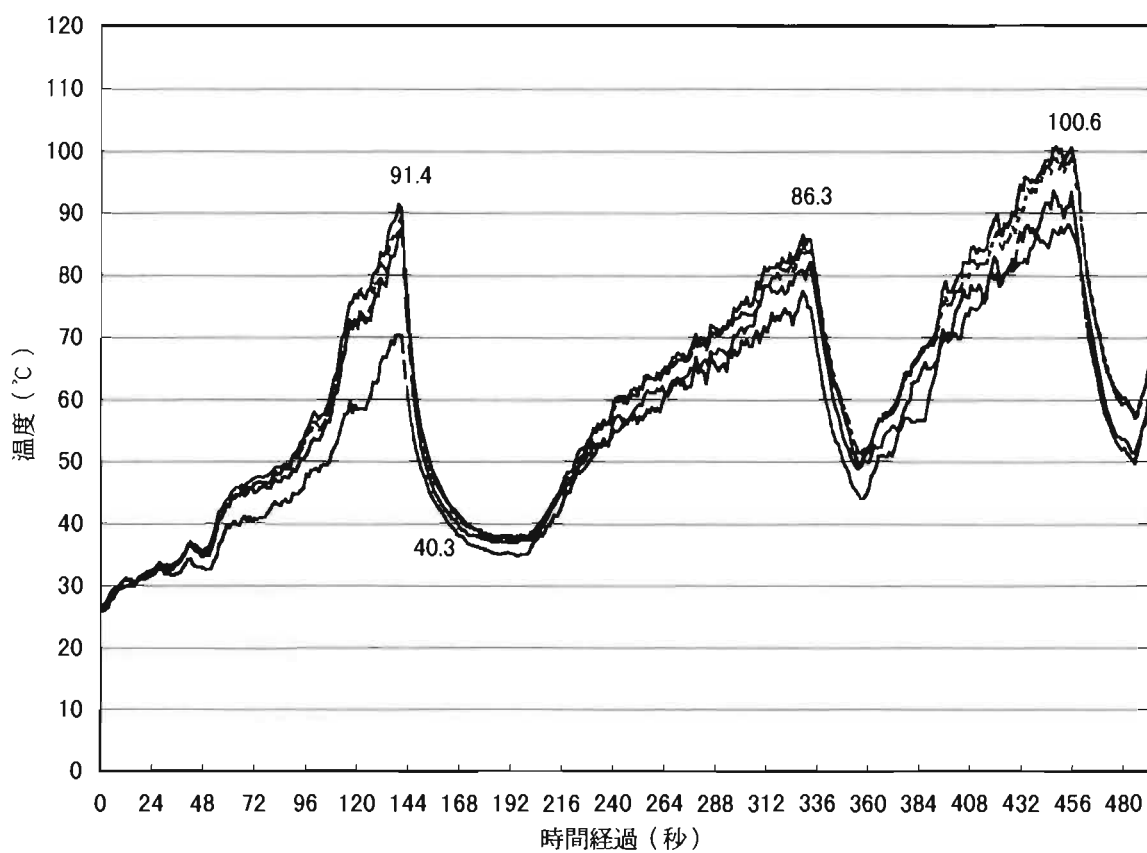
現在のスプリンクラーは、火災初期に自動で消火を行うため、消火設備としては大変有効な設備である。しかし、その反面放水を自動停止できないため、水損が拡大することがある。この欠点を少しでも解消し、スプリンクラーの普及促進のため更に研究開発を進め、実用化に向けて性能の向上と小型化を図っていきたい。

7 その他

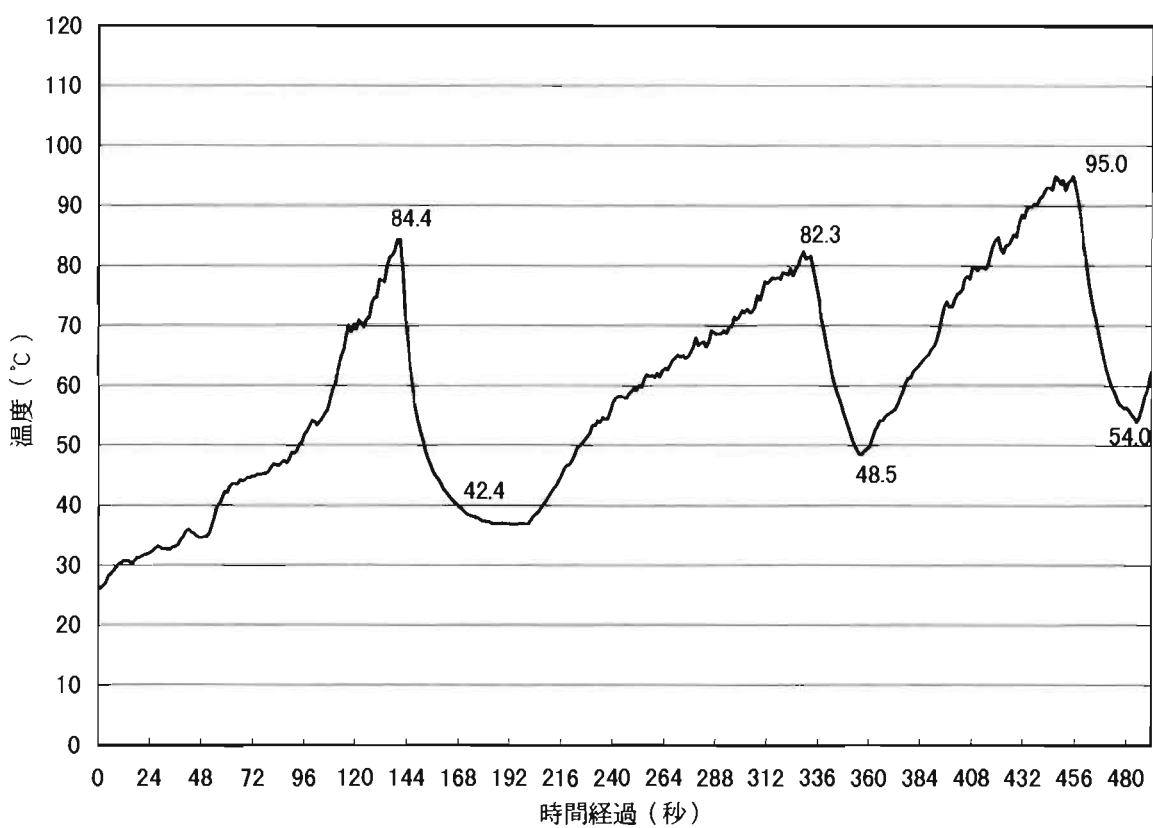
本研究開発は、東京消防庁消防科学研究所第三研究室とトキ・コーポレーション株式会社との共同研究である。

参考文献

形状記憶合金のおはなし 根岸 朗 著(日本規格協会)



グラフ1 ヘッド近傍4点の温度変化



グラフ2 ヘッド近傍4点の平均温度