

「木材およびマグネシウム」火災に有効なケイ酸化合物系消火剤

三生技研株式会社

真 隆志、菅原鉄治

日向市消防本部

松木巖生

宮崎大学

塩盛弘一郎

1. 研究の背景.

平成 23 年度の経産省の工業統計調査では、金属製品製造業の事業所の割合が 13.5% (事業所数: 5 万 9,686) であり、最も多い¹⁾。近年では、軽金属やマグネシウム (以後マグネシウムと記す) 合金の需要が伸びており、2014 年には 4 万トン以上が製造²⁾されている。設計した剛性を保持できる実用金属の中で、マグネシウムは最も軽量であることから、ヘリコプター部品や自動車産業への需要が急速に拡大している³⁾。部品の増加量に伴い、最終成型や削りだしによる部品製造等による切削機会も増加する。水溶性切削剤が開発³⁾されているものの、火災に至る事故は、2 年に 1 回程度発生⁴⁾している。小型ガス着火試験による平均着火時間を調査すると、鉄やニオブ、チタン等の粉末と比較して、マグネシウム粉末は着火に至るまでの時間が非常に短く (3 秒)、その発熱量も高い⁵⁾。工場でマグネシウム粉に着火すると、その消火の困難さから火災が拡大しやすく、過去の事例でも、長時間の消火活動⁶⁾が強いられてしまう。特に 2014 年のマグネシウム火災では、複数の場所で連鎖的に爆発が起こったとされ、乾燥砂を投与した消防隊員の危険度は、非常に高かったと考えられる。住民に対する危険性の除去や、消防隊員自身の安全性の向上・確保のため、マグネシウム火災を何らかの方法により、短時間で消火できる革新的方法が望まれる。

筆者らはこれまで、木造部材に耐火性を付与するため、感温性無機組成物を用いて研究開発⁷⁾を行ってきた。ISO834 の標準加熱温度曲線に準じた加熱環境にて、板状に加工した感温性組成物が、温度を感知して積層発泡することで、木造部材に 1 時間の耐火性能を付与できた。これは、熱によって重合反応を開始させ、逐次的に形成する固体泡の形と大きさ、そして泡の耐熱性を向上させたことに由来する。このように、火災熱を重合開始のスイッチとし、燃焼物の形状に沿った無機物の被膜を燃焼物の表面上に合成できるならば、元来耐火材として開発してきた材料が、消火剤としての機能を発揮するのではないかと考えた。そこで、ラボスケールにて消火剤の開発を進めたところ、ケイ酸化合物を主成分とする本消火剤は、水よりも消火能力が高いことが明らかとなった⁸⁻¹¹⁾。

本研究では、加熱によって燃焼物表面上に無機物を被覆する特性の適用をさらに進めた。木材火災では、高圧洗浄器を使用して、A1 クリブの消火を実証し、本消火剤の消火能力を定量化した。金属マグネシウムの消火では、消火剤の様態 (固体から液体まで) に依存する消火挙動を検討し、金属消火に有効な状態を探索した。さらに、スケールアップしたマグネシウムに対して、粘度の異なる消火剤を噴霧し、消火挙動に対する詳細な検討を行った。また、被覆状態及び消火後のマグネシウム内部を調査し、消火に至るまでの被覆物のガ

スバリア性を検討した。さらに、消火時の周辺温度を測定し、延焼抑止効果も検討した。これら実験結果から得られた事柄をまとめ、従来の金属マグネシウム消火法と異なる消火戦術の検討を行った。

2. 液体の本消火剤を用いた A1 クリブの消火実証試験

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)に準ずる A-1 クリブ(図 1)を用いて、消火実験を行った。熱電対は K 型(φ0.65mm)を図 1 のようにクリブのセンターを貫き、なおかつ高さが異なる位置に設置した。室内で気乾させた杉材は含水率 11.5%であった。1.5L のガソリンを燃焼鍋に注入し、たいまつ

で点火した。3 分間燃焼させた後、直ちに消火操作を行った。なお、消火剤は予め高压洗浄器に充填し、消火に使用した容量は事前に測定した液比重と消火前後の重量差によって決定した。用いた消火剤は、1.5%ケイ酸アルミニウム/混合ケイ酸カリ溶液で、粘度は 1.98mPa·s である⁸⁻¹¹⁾。実験結果を表 1 と図 2 に示す。実験環境的に無風状態にすることができず、常時風が吹き、時折強風の状態で消火実験を行った。結果として、消火液量 3.8L に対して消火単位 1 であることが分かった。消火後、クリブに触ると、消火剤のかかった箇所はコーティングされ、指に炭がほぼ付着しなかった。このようにラボスケールよりも熱量の高い A-1 クリブサイズで、燃焼物表面上に消火剤由来の無機物を被覆できることを実証した。

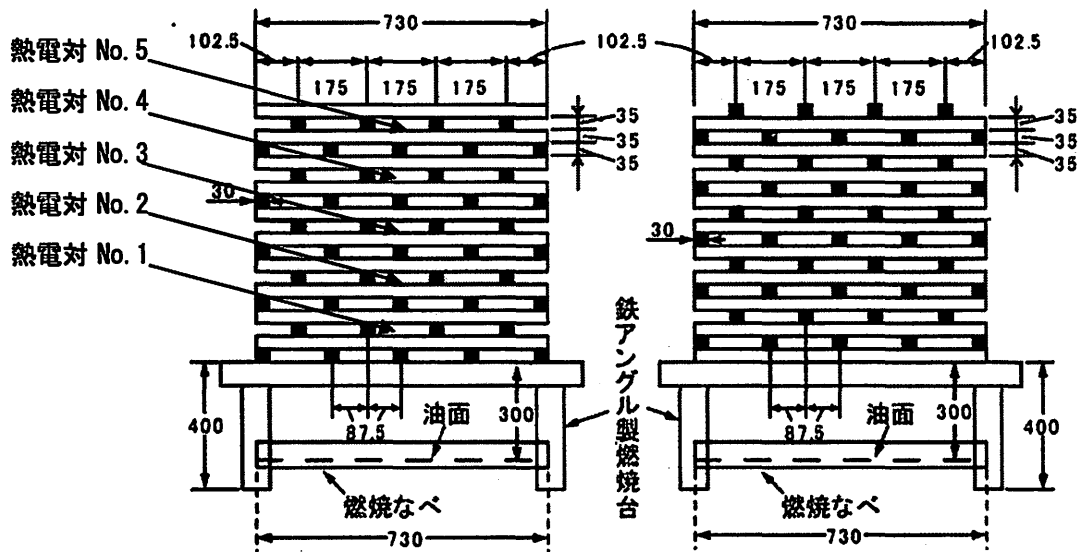


図 1 A1 サイズのクリブ寸法および各熱電対の位置

表1 A1 クリブ消火の実験データ

測定項目	測定法	測定値
粘度	振動型粘度計 [mPa·s]	1.98
① 液比重	定容重量測定 [g/ml]	1.088
固形分濃度	絶乾法 [%]	11.1
クリブ水分率	木材水分計 [%]	11.5
気温	風速計機能使用 [°C]	13.3°C
消火液の液温	電子温度計	10.3°C
湿度	風速計機能使用 [RH%]	47.6
風速 (基準 0.5m/sec 以内)	風速計 [m/sec]	3.0~0.2 : 強風 (基準を越す)
消火液仕込み重量	計量器 [kg]	6.51
実験終了時消火液重量	計量器 [kg]	2.38
② 実験に使用した液重量	計量器 [kg]	4.13
③ 実験に使用した体積	②/① [L]	3.80
④ 総噴霧時間	デジカメから計測 [min]	1.65
平均噴霧速度	③/④ [L/min]	2.30
消火能力単位	水は 8L で 1 単位	2 単位 : 水の 2 倍 (8L 換算)

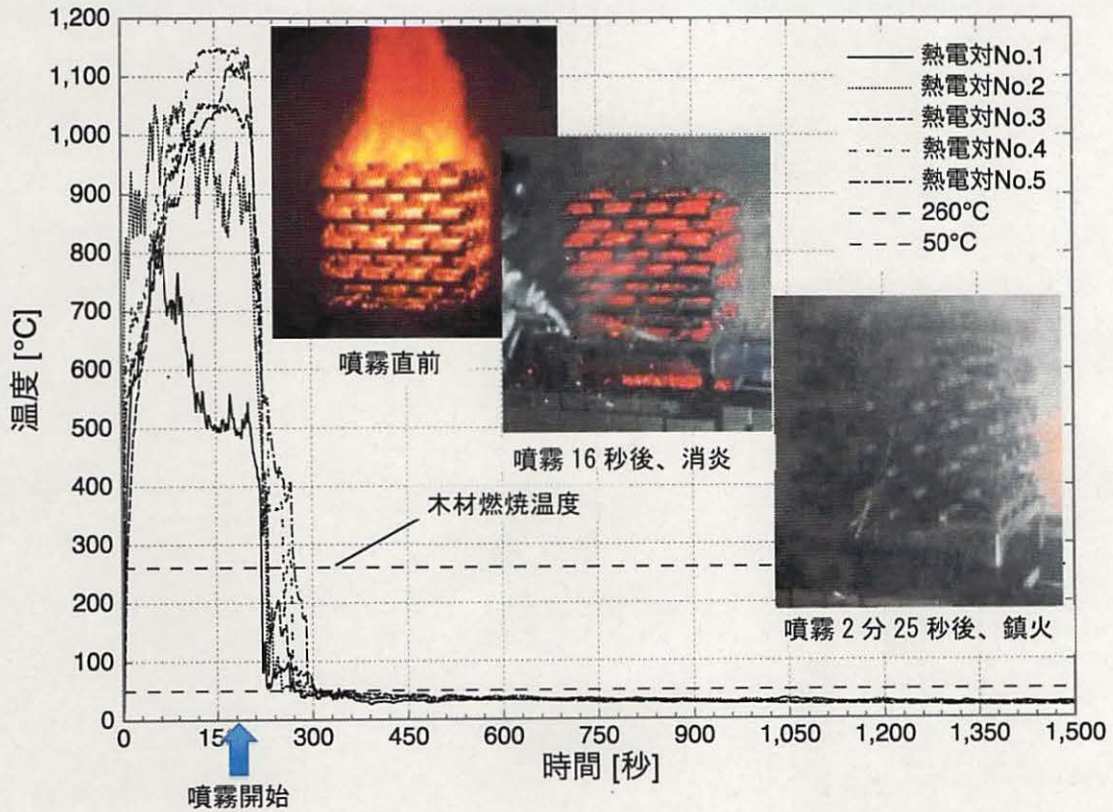


図2 本消火剤を噴霧したA1 クリブ内の温度変化と消火時の様子

3. マグネシウム火災に効果的な本消火剤の状態の選択

本消火剤は、含水率を制御することで様々な状態に変化させることができる。図3に、3gのマグ

ネシウム消火に用いた様々な状態の消火剤サンプルを示す。このように種々の状態に変化することができる本消火剤が、着火しやすく発熱量の高いマグネシウムに対して、どの状態まで消火可能で

あるか調査した。実験方法は、望月らの方法¹²⁾に準じて、図 4 のように設置し行った。燃烧させた 3g のマグネシウムの底面温度が 1,000℃を計測して、直ちに各消火剤を投下した。そのときのマグネシウム底面温度の経時変化を図 5 に示す。ここで、図 5 中に消火せず、にそのまま 3g のマグネシウムを自然燃烧させた結果を実線で示す。また、表 2 に各サンプルの状態、固形分濃度、消火に使用した消火剤の量および 300℃到達時間を示す。ここで、300℃到達時間を記載しているが、文献 12 にマグネシウムは 300℃よりも低い温度になると、再び温度上昇しない記載があった。そのため本稿では、マグネシウムの消火温度を 300℃と設定した。サンプル 1-1~1-3 まで固体であり、それぞれ粒径が異なる。固体では、粒径が小さくなると共に劇的な温度低下が見られた(図 5)。これは、固体の粒径が小さい方が円錐状のマグネシウムに効率よく密着でき、窒息効果が直ちに表れたためであると考えられる。その後の緩やかな降温は、(本消火剤特有の固体泡が生成・積層した)発砲層による放熱の阻害である。ペースト状に調製したサンプル 1-4 は、マグネシウム火源に投下を試みるものの粘度が高く、燃烧するマグネシウムへの瞬間的な投下ができなかった。そのため、劇的な温度低下が始まるまで時間を費やしていることが分かる。被覆後の降温が速いのは、ペースト状であるため、マグネシウムとの密着が固体の場合

よりも良く、強い窒息効果があったことに加え、ペーストに含有する水の量が固体よりも多い(図 3 中に含水率記載)ためである。ペースト状の消火剤では、300℃に到達した時間は図 5 の中で最も短く、明らかに消火作用を発揮した。降温挙動は優れているが、火源投入の操作性が悪かった。そこで、噴霧可能な状態にすれば操作性良く、なおかつマグネシウム火源への水の供給量も増加し、消火効率が良くなるのではないかと考えた。サンプル 1-5 を燃烧するマグネシウムへ噴霧した。噴霧した瞬間を図 5 中の左の写真に示す。マグネシウムが弾け飛ぶ様子は見られない。噴霧する度に微小な発泡体がマグネシウムに付着し、続けて噴霧すると、先に付着した泡の隙間を縫うように、新しい発泡体が被覆した。被覆が完了した直後の写真を図 5 の右の写真に示す。図 5 右の写真的マグネシウムの底面温度は約 800℃であり、被覆内部は赤熱状態にある。しかしながら、図 5 の写真右では、被覆物が白色を呈する状態であり、赤色は目視できない。サンプル 1-5 では噴霧直後から急激に降温しており、その後は時間の経過と共に緩やかな曲線で降温した。300℃に到達した時間は 438 秒であり、使用した消火剤量は僅か 5g であった。

以上のように、液体の本消火剤でマグネシウムを消火できることを示した。

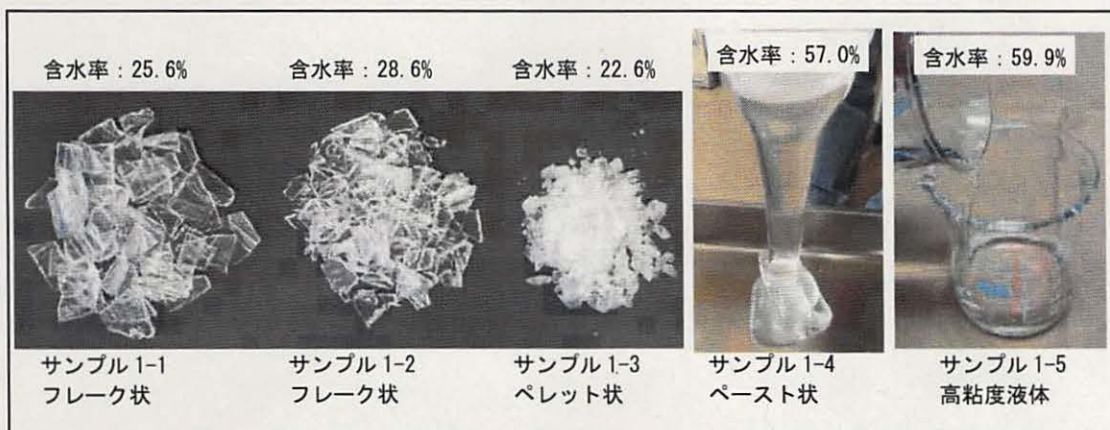


図 3 3g のマグネシウム消火に用いた様々な状態の消火剤サンプル

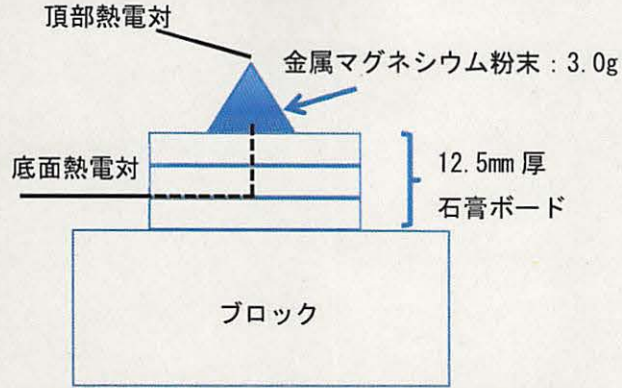


図4 3gのマグネシウム消火実験の装置・用具の配置

表2 3gのマグネシウム消火に用いた各サンプルの物性

サンプル	状態: 粒径や粘度	固形分濃度[%]	使用量[g]	300°C到達時間[秒]
1-1	フレーク状: 約10mm	74.4	25	447
1-2	フレーク状: 3~7mm	71.4	22	443
1-3	ペレット状: 約2mm	77.4	12	495
1-4	ペースト状: 1.63Pa·s	43.0	29	370
1-5	高粘度液体: 36.9mPa·s	40.1	5	438

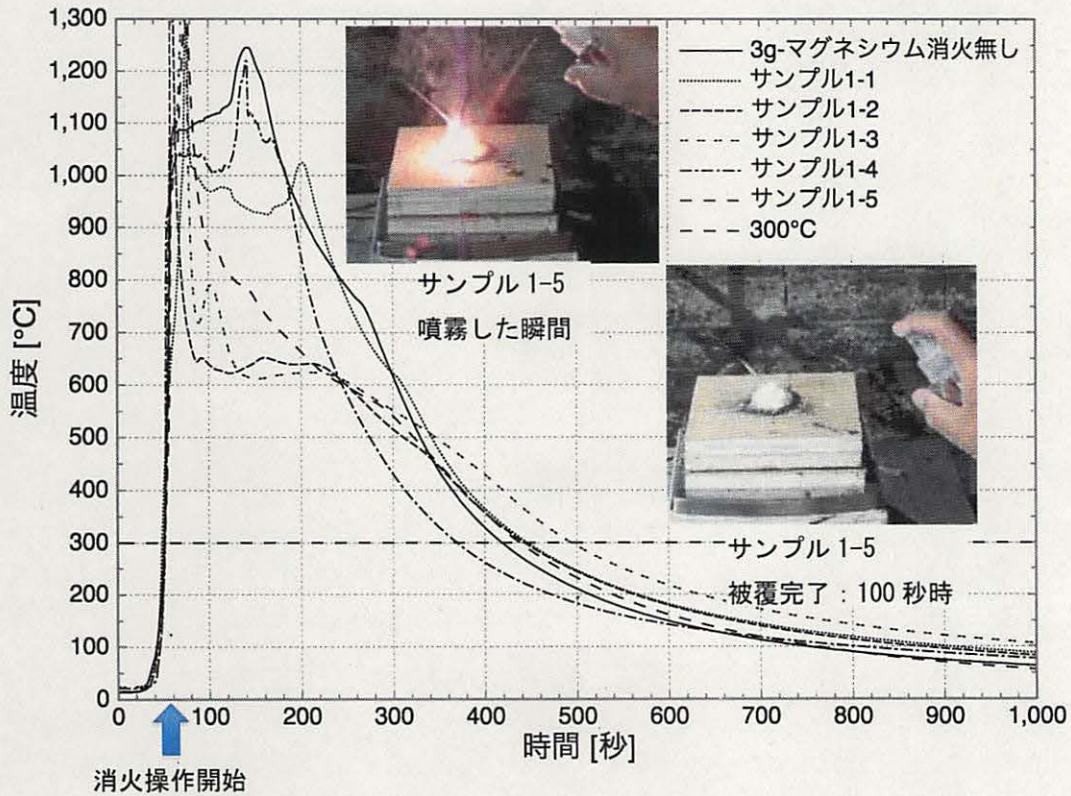


図5 3gのマグネシウムを各サンプルで消火した場合の底面温度の経時変化と、液体を用いた場合の消火時の様子

4. マグネシウム消火の降温のきっかけと消火効果の発現

マグネシウムを 12g にスケールアップし、図 6 のように石膏ボードの裏面温度を新たに計測できるようにした。消火剤の噴霧操作は、熱電対が底面温度 1000℃ を計測して直ちに行い、赤熱状態のマグネシウムが見えなくなるまで続けた。液体の各サンプルの調製は、原液の消火剤を希釈して、粘度を 20.4~1.96mPa・s まで変えて行った。図 7 に 12g のマグネシウムを液体の各サンプルで消火したマグネシウム底面温度の経時変化を示す。また、表 3 にサンプル名、粘度、固形分濃度、消火に要した液の使用量、液中の固形分量および 300℃到達時間を示す。図 7 中に示す比較的粘度の高いサンプル 2-1 と 2-2 は、マグネシウムに噴霧する度に微小な発泡体がマグネシウムに付着し、続けて噴霧すると泡の隙間を縫うように被覆した。固形分濃度が高いため、マグネシウムを被覆するまでの時間が短かった。被覆後は、時間の経過とともに降温し、300℃に到達した時間はいずれも消火無しの場合よりも短時間であった。消火剤の原液である約 20mPa・s までの粘度であれば、降温時間が短く消火効果を有することが分かった。中程度の粘度であるサンプル 2-3 は、サンプル 2-1 や 2-2 と比較すると若干固形分濃度が低いため、マグネシウムを覆うまでに時間が掛かった。そのため、被覆後の降温開始時間が若干遅くなっている。降温開始した後は、サンプル 2-1 および 2 の降温挙

動に沿うように低下した。サンプル 2-3 についてもサンプル 2-1 および 2-2 と同程度の消火効果を有していることが分かった。最も粘度の低い(2節で使用した消火剤とほぼ同じ)サンプル 2-4 は、固形分濃度が低いため、マグネシウムを覆うまでに時間を要した。しかしながら、燃焼するマグネシウムの表面に無機物が被覆した後は、時間の経過とともに劇的に降温した。この劇的な降温は、被膜形成までに使用した液体(消火剤)がマグネシウム周辺に留まることで、間接的な冷却作用を窒息作用と共に相乗的に発揮したと考えられる。300℃に到達した時間は最も短く 640 秒であり、使用した消火剤量は 57g であった。

燃焼するマグネシウムを降温させるきっかけは、無機被膜がマグネシウムを覆う窒息作用であることが分かった。表 3 の液中の固形分量がほぼ一定であることから、約 7g の固形分で 12g のマグネシウムを被覆できる。直接比較することはできないが、同量の 12g マグネシウムの消火を行っている文献¹²では、粉体の消火剤を 300g 使用している。この知見と比較すると、本消火剤では固形分換算で、約 1/40 の量にてマグネシウムを消火できる(液体の量で比較すると約 1/5~1/15) ことが分かった。冷却作用の発現には、被覆形成までに費やした液体の量に依存した。そのため、最も粘度の低いサンプル 2-4 の冷却が最も良好であり、300℃到達時間が短く消火効果も良好である。

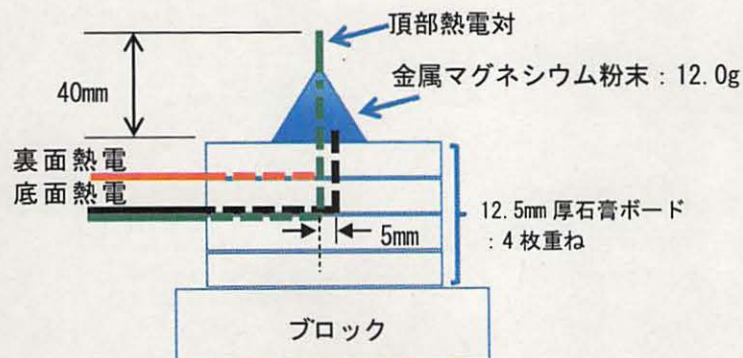


図 6 12g のマグネシウムを消火する時の実験装置用具配置

表 3 12g のマグネシウム消火に用いた各サンプルの物性

サンプル	粘度 [mPa·s]	固形分濃度 [%]	液使用量[g]	液中の固形 分量[g]	300°C到達時間 [秒]
2-1	20.4	35.9	20	7.2	796
2-2	12.5	33.4	17	5.7	786
2-3	3.83	23.7	35	8.3	810
2-4	1.96	10.9	57	6.2	640

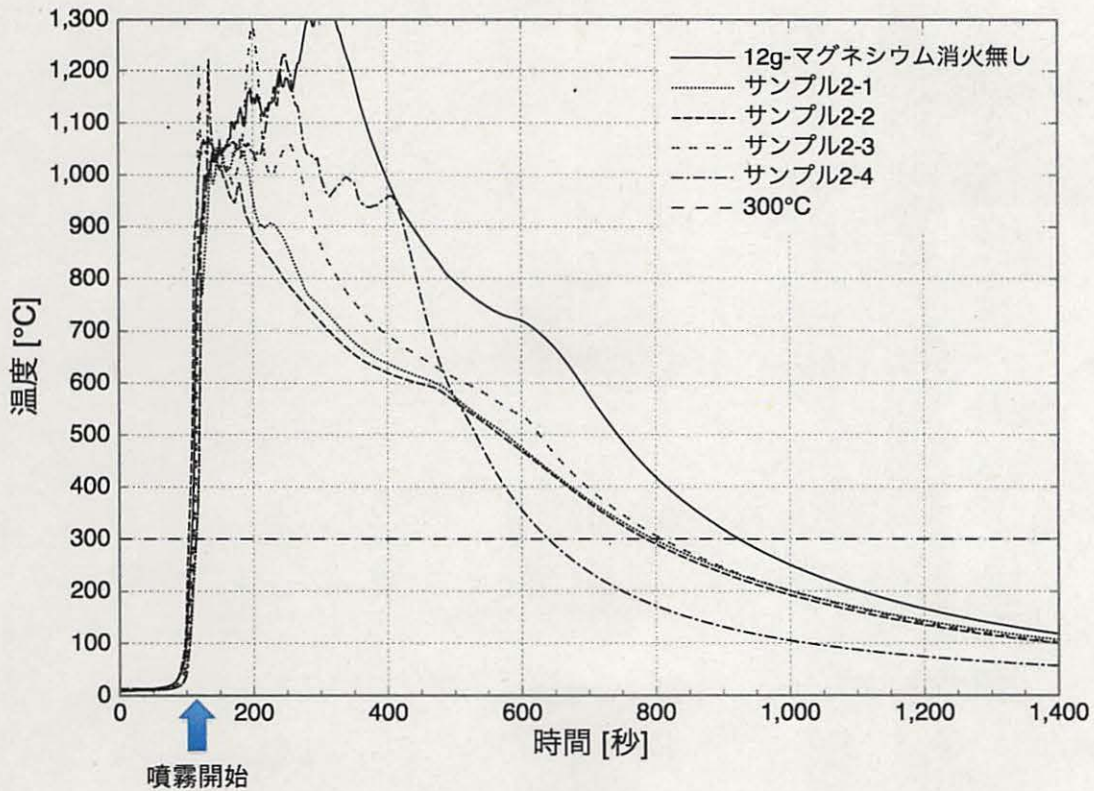


図 7 12g のマグネシウムを液体の各サンプルで消火したマグネシウム底面温度の経時変化

5. マグネシウムに被覆する無機物の形状制御と、
マグネシウム内部への液体の侵入制御

図 8 に燃焼前の 12g のマグネシウムおよび消火無しと、消火後のマグネシウム外観の様子を示す。図 8 中の上から 1 段目に燃焼前の 12g-マグネシウムの様子を示す。このように成形した後、消火実験を行っている。図 8 中の上から 2 段目は、消火剤を噴霧せずに 12g-マグネシウムをそのまま空气中で燃焼させた結果である。白色を呈する外殻の物質は、酸化マグネシウム¹²⁾である。また、マグネシウムを貫通する熱電対に堆積している物質は、燃焼時に発生するマグネシウムヒュームであり、

熱電対に付着・堆積した。図 8 の高粘度のサンプル 2-1 は、固体泡で良好にマグネシウムを被覆している。同様に、図 8 のサンプル 2-2 および 2-3 も良好に固体泡で被覆している。図 8 の最も低粘度のサンプル 2-4 は、当初から木材の消火剤として開発した薬剤である。本稿の木材の消火剤は、熱によって合成される無機被覆物が、薄い膜の形状になるように設計⁸⁻¹¹⁾している。図 8 のサンプル 2-4 では燃焼するマグネシウムに対して何度も噴霧したため、固体膜の断片が密に重なった状態で被覆していることが分かる。

このように、マグネシウムを被覆する無機物の

状態は、粘度によって2つの種類に制御できた。粘度を高くすると固体泡が積層した発泡層で、粘度を低くすると、固体膜片が集積した密集型のファイラーでマグネシウム表面を覆うことができる。根本らは、マグネシウムへの水の供給を噴霧放水にすれば爆発せず、冷却可能であることを示した¹³⁾。これは、水を連続的に供給する環境において、水の圧力を物理的に制限すれば、マグネシウム内部への水の侵入を防ぐことができるためである。

一方、連続的に供給する環境において本消火剤は、熱を感知することで(供給初期に)燃焼中のマグネシウムを無機物で被覆し、その被覆物によってマグネシウム内部への液体の侵入を防げる。このように本消火剤は、熱に反応する化学的作用によってマグネシウム内部への液体侵入を防ぐ。現象的には噴霧放水の場合と同じ効果が得られるため、本消火剤を用いても水蒸気爆発しにくい状況を作り出すことができる。

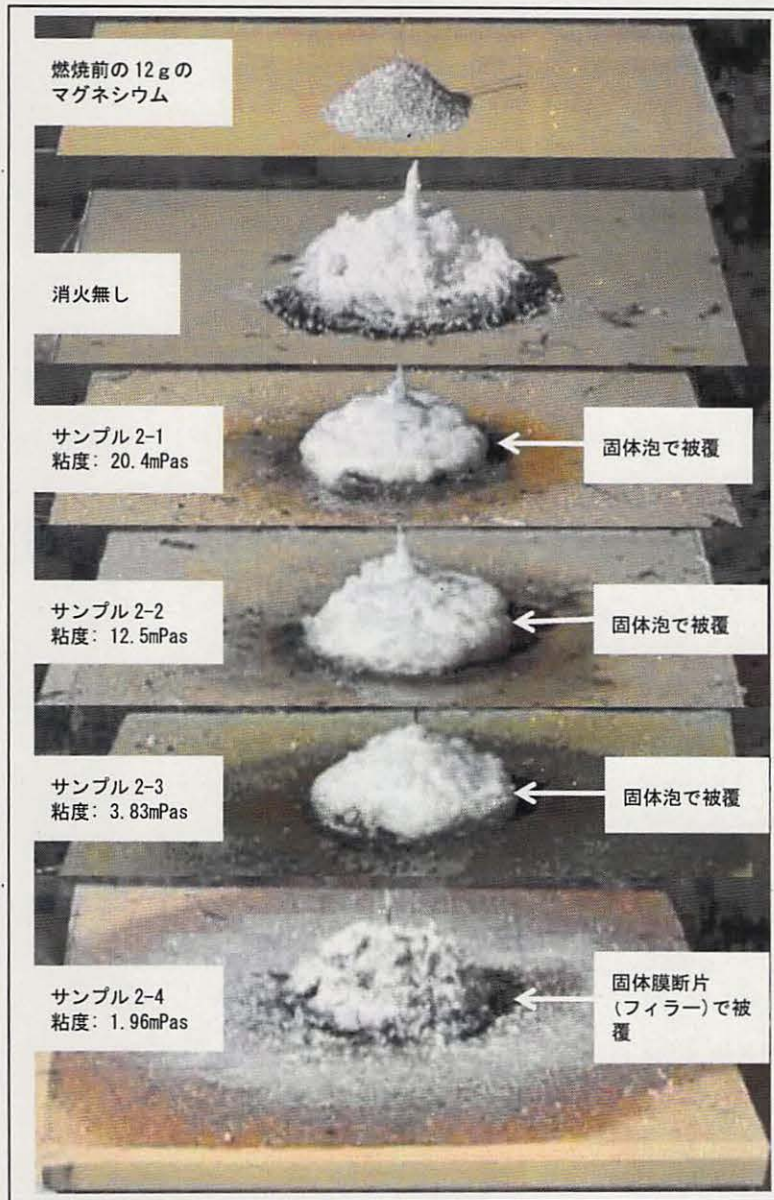


図8 燃焼前の12gのマグネシウムおよび消火無しと、消火後のマグネシウムの外観の様子

6. 消火に至るまでのマグネシウムの状態と、被覆物の密着状態と位置の特定

空気中でマグネシウムを燃焼させると、酸素や窒素と熱反応し、白色或いは黒色の酸化マグネシウム、さらには黄色の窒化マグネシウムを生成する。酸化マグネシウムは水と反応して発熱することは無いが、窒化マグネシウムは水とたやすく反応¹⁴⁾し、アンモニアガスの生成を伴って発熱する¹²⁾ことが分かっている。鎮火を考慮した場合、消火したはずの物質が、別の発熱体(例えば窒化マグネシウム)に大量に変性すると、消火現場の混乱は避けられないと予想できる。そこで、図7及び図8の消火したマグネシウムの断面写真を撮影した。マグネシウムを被覆する状態が2種類であったため、粘度の高い代表的なサンプル2-1と粘度の低い2-4を、比較のため消火無しの場合も併せて図9に示す。図9に示す消火無しは、マグネシウム内部の多くが窒化マグネシウムへと変化し、長時間マグネシウムが窒素ガスに接していたことが分かる。これは、常圧下において高温で窒素ガスと接触しているマグネシウムは劇的に窒化速度が増大する¹⁴⁾ことと一致している。図9の高粘度のサンプル2-1の断面は、内部のほとんどが黒色を呈しており、酸化マグネシウム¹²⁾の状態で消火していることが分かる。ここで、マグネシウムの表層が僅かに黄色を呈しているが、その少なさから、燃焼しているマグネシウムにはほとんど窒素ガスが接触せず、良好な窒息状態が保たれたこと

が分かる。そのため、消火に至るまで窒化マグネシウムの生成はほぼ進行しなかった。また、消火剤がマグネシウム内部に侵入した形跡は無かった。このように、粘度の高い消火剤が形成した無機被覆物は、マグネシウム消火時のガスバリア性が高い。図9の粘度の低いサンプル2-4の断面も、内部のほとんどが黒色を呈していた。窒化マグネシウムの生成は、サンプル2-1よりもほんの僅かに多いように見受けられる。その分布はマグネシウム表面に0.1mm程度の厚みで薄く存在しており、表面の一部のみ覆っていた。これは、粘度が低いため、薄膜が重なって被覆完了するまでの間に窒化マグネシウムが生成した。しかしながら、マグネシウム内部は大部分が酸化マグネシウムであったことから、十分に窒息作用を発揮している。またサンプル2-4においても、マグネシウム内部に消火剤が侵入した形跡は無かった。このように、粘度の低い消火剤が形成した被覆物であっても、ガスバリア性は良い。

以上のように粘度の高い消火剤はもちろん、粘度を低くした消火剤においても、固体膜の被覆は良好な窒息作用を発揮していることが分かった。また、被膜を形成している位置は、マグネシウム表面上に限られ、密着良く接していることが分かった。さらに本消火剤の被覆物はガスバリア性が高く、鎮火後のマグネシウムにはほとんど窒化マグネシウムが含まれないことが分かった。



図9 消火後のマグネシウムの断面の様子

7. 被覆物の延焼抑止性について

本消火剤が高粘度であれば、元来の耐火材の遮熱特性⁷⁾が濃く反映され、固体泡の発泡層がかさ高く形成し、延焼抑止効果も高い。そこで、消火剤の粘度が低く、最も遮熱性が低いサンプル 2-4 の場合の消火時の周辺温度を計測した。その結果を図 10 に示す。図 10 中の頂点温度はマグネシウムの燃焼熱によって劇的に昇温するが、噴霧によって瞬時に降温する。噴霧開始して約 180 秒後に一旦頂点の温度が上がったのは、マグネシウムの被覆がまだ完全はないためであるが、その 20 秒後には 100°C を下回った。その後、頂点温度は 100°C 近傍を保持しており、ほとんど温度の上昇は見られなかった。サンプル 2-4 のマグネシウム表面の被覆は 450 秒に完了している。例えば 450 秒では、

マグネシウム底面の温度は 900°C を計測しているが、マグネシウム頂点の温度は 100°C 以下を計測している。燃焼が進行することで、底面温度が低く計測された粉末 ABC 消火剤の場合と異なり¹⁵⁾、本消火剤の上方への遮熱性は極めて良好であることが分かった。一方、石こうボードを 1 枚介した裏面温度は、マグネシウム下方への伝熱状況を示す。図 10 の裏面温度は、最も高い温度でも木材燃焼温度の 260°C を超えず、良好な遮熱性を発揮していることが分かった。これは、消火剤を大量に噴霧(本消火剤系列に限る)したため、間接的冷却効果が発揮されたものである。このように固体膜片が集積する被覆物になるサンプル 2-4 においても、周辺温度を充分低くすることができ、延焼抑止性を持つことが明らかになった。

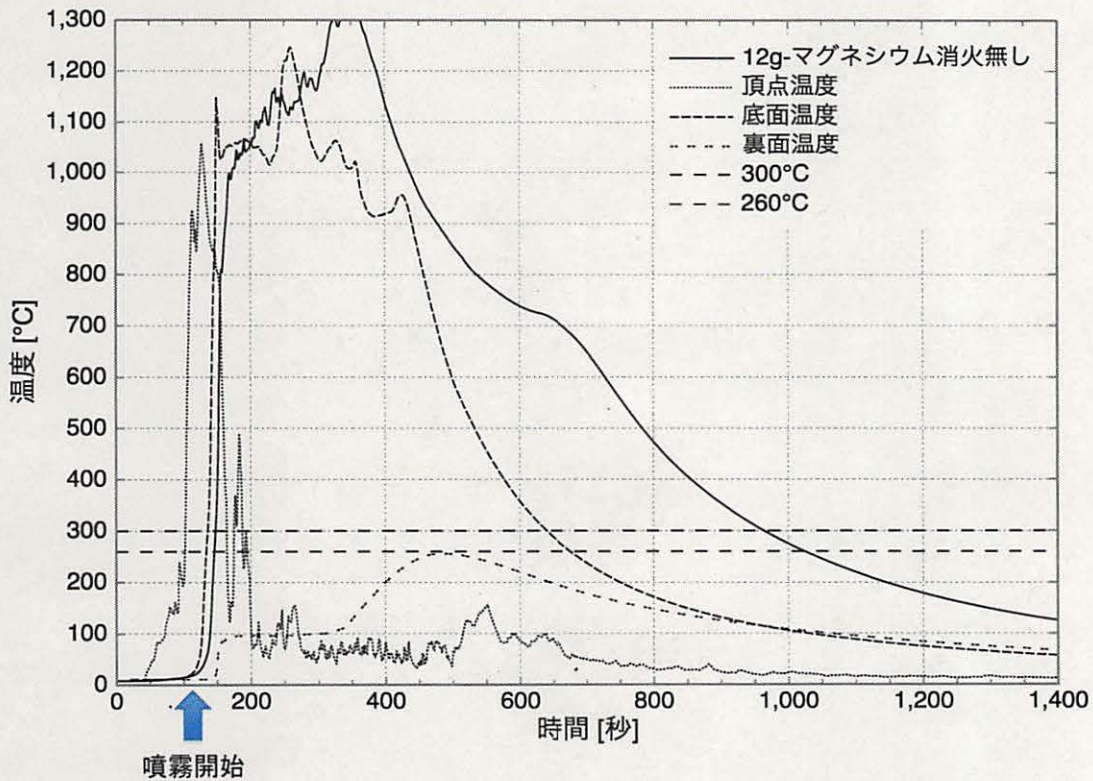


図 10 12g のマグネシウムをサンプル 2-4 で消火した時の周辺温度および底面温度の経時変化

8. マグネシウム消火に関する新しい消火戦術の提言

本消火剤の特徴は、

- 1) 燃焼するマグネシウム表面上にのみ無機被覆物を形成し、密着度の高い窒息作用を発揮すること。
- 2) マグネシウム内部への液体の浸透が無く、水蒸気爆発しないこと。
- 3) 窒素ガスをバリアし、消火残物は安全な酸化マグネシウムであること。
- 4) 消火剤の粘度を低くすれば冷却効果が高くなり、短時間で消火可能であること。
- 5) 粘度を高くすれば、水損被害を抑えることが可能なこと。
- 6) 低粘度の消火剤でも遮熱性が非常に高く延焼抑止効果を有すること。
- 7) 木材火災も消火することができること。
- 8) 液体としても使用可能であること。

以上 8 点である。これらの点を考え合わせると、マグネシウム火源から離れて噴霧放水することによって、マグネシウム火災と木材火災の消火活動が同時に行うことができる。この噴霧放水による火源からの距離は、建物火災に準じた行動をとることができると考えられ、消防隊員がこれまでに訓練してきた安全確認を所定通りに確保でき、危険度を著しく低くできるとともに、短時間での消火が見込まれる。さらに液体での使用を可能にしたことから、消防装置が充分とは言えない地方であっても、マグネシウム火災の被害を食い止めることができる。

波及効果として、消火器に充填すればマグネシウム火災の初期消火が可能になる。これまでの粉体と比較すると、火源から離れた位置で、噴霧量が少なくても良いことから、消火後または消火活動中に消防署への連絡など適切な処置を行う時間を確保することができる。

謝辞

本研究は「平成 29 年度消防防災科学技術研究推

進制度委託研究」(新手法開発型研究開発事業)による成果の一部である。本実験の遂行にあたり、宮崎県消防学校の施設を使用させて頂きました。各位の支援に対して謝意を表します。

参考文献

- 1) 平成 23 年度, 我が国の工業 変化を続ける製造業, 経済産業省経済産業政策局調査統計部
- 2) 一般財団法人 日本マグネシウム協会ホームページ, マグネシウム需要動向, マグネシウム資料集, <http://magnesium.or.jp/statistical-data/>, (参照 2018.04.27)
- 3) 武林慶樹, 小池進; “Mg 鋳物の技術および市場動向,” 神戸製鋼技法, Vol.47, pp.69-72(1997).
- 4) マグネシウム等の安全対策マニュアル, 消防庁危険物保安室(平成 28 年 6 月)
- 5) 野田哲也, 鈴木健司, 菊池保正, 森尻宏; “金属火災に関する検証,” 消防技術安全所報, Vol.43, pp.128-134(2006)
- 6) 国立研究開発法人産業技術総合研究所 飯田光明のページ, 爆発関連ニュース, <https://staff.aist.go.jp/m.iida/news/News2014-1.htm>, (参照 2018.04.27)
- 7) 三生技研株式会社、国立大学法人宮崎大学; “感温性無機組成物,” 特許第 5854422 号 (平成 27 年 12 月)
- 8) 消防庁平成 29 年度消防防災科学技術賞優秀賞; “感温性を有する新規消火剤の消火特性と物性,” 真 隆志, 菅原鉄治, 松木殿生, 塩盛弘一郎(平成 29 年 11 月)
- 9) 真 隆志, 菅原鉄治, 松木殿生, 塩盛弘一郎; “水ガラスを主成分とした新規な被覆形成消火剤の開発と消火特性,” 科学・技術研究, Vol.7 (2018.6) 掲載決定
- 10) 真 隆志, 菅原鉄治, 塩盛弘一郎; “感温性素材を利用した新規消火剤,” 平成 29 年度日本火災学会 (平成 29 年 5 月 20 日)
- 11) 真 隆志, 菅原鉄治, 塩盛弘一郎; “ケイ酸化合物を用いた消火剤の検討,” 第 55 回燃焼シンポ

ジウム (平成 29 年 11 月 15 日) .

- 12) 望月真, 山東俊, 佐藤和広; “金属粉に関連する火災の消火方法に関する検証,” 消防技術安全所報, Vol.46, pp.96-101(2009)
- 13) 根本昌平, 楠本直樹, 山越靖之, 塚原学, 海和晋史, 町井雄一郎; “マグネシウム火災に対する乾燥砂等の消火効果に関する検証,” 消防技術安全所報, Vol.52, pp.48-59(2015)
- 14) 板谷清司, 岸岡昭, 木下真喜雄; “窒化マグネシウムおよび関連化合物の諸性質,” Gypsum & Lime, Vol.250, pp.40-48(1994)
- 15) 根本昌平, 楠本直樹, 塚原学, 海和晋史, 町井雄一郎; “マグネシウム火災に対する金属火災用消火薬剤及び ABC 火災用粉末消火薬剤の消火効果に関する検証,” 消防技術安全所報, Vol.52, pp.60-68(2015)