

危険物保安技術協会理事長賞

引火性液体火災発生時における火傷危険性予測

科学警察研究所 法科学第二部
藤本純平、岡本勝弘、柏木伸之、市川俊和、山崎宏樹、本間正勝

1. はじめに

科学警察研究所法科学第二部火災研究室では、電気配線や電気器具類、石油燃焼器具、たばこ火などが起因する火災の原因究明、大規模火災や放火における燃焼実験とその現象解析、着火原因などに関する研究並びにこれらの技術を応用した鑑定、検査を行っている。

科学警察研究所は、警察庁の附属機関であるため、これらの研究や鑑定等は、法執行に必要な科学的な調査、実験及び解析を行うための新たな科学技術の開発や犯罪事実の立証を目的としているが、我々が行っている研究が産業に関わる各種災害の防止を目的とした安全工学分野や危険物事故防止対策に役立てることはできないかと考えた。





現在、我々は放火事件や工場等での危険物漏出事案等を想定し、室内に拡散した多成分系液体可燃物の火災危険性についての研究を行っており、その一端として自動車等の燃料に使用されるガソリン、工場等では有機溶剤として塗装、洗浄、印刷等の作業に使用されるトルエン、アセトン等が含まれる引火点が 20 °C 以下の第 4 類危険物第一石油類に分類される引火性液体について場所や季節の違いによる環境温度の変化が燃焼性状に与える影響について研究を行っている¹⁾。

本論文では、前記の研究成果を活用して引火性液体の火災発生時における火傷危険性を予測することにより、引火性液体危険物を取扱う工場や貯蔵所等での危険物漏出事発生時、除去作業等に従事する作業員や火災発生時の消火活動従事者の危険性評価に有用な情報の提供が可能になると考え、環境温度の違いによる引火性液体の燃焼性の変化を明らかにするとともに、引火性液体火災発生時における火傷危険性予測について報告する。

2. 実験試料

実験試料には、代表的な石油系液体燃料である自動車用ガソリンのほか、ガソリンの主成分の一つであるトルエン (C₇H₈)、シンナーの成分である酢酸エチル (CH₃COOC₂H₅) 及びアセトン (CH₃COCH₃) の 4 種類の引火性液体を使用した。実験試料の特性については表 1 に示す。

表1 実験試料の特性

実験試料	トルエン	アセトン	酢酸エチル	ガソリン
				
比重	0.87 ²⁾	0.79 ²⁾	0.90 ²⁾	0.72 ³⁾
蒸気圧 (20°C)	2.9 kPa	24.2 kPa	9.7 kPa	31.0 ~ 46.1 kPa
沸点	111 °C	56 °C	77 °C	70 °C 以下 (10%留出温度)
引火点	5 °C	- 20 °C	- 4 °C	- 50 ~ - 40 °C ³⁾
燃焼熱	42.4 MJ/kg ²⁾	30.8 MJ/kg ²⁾	25.6 MJ/kg ²⁾	43.7 MJ/kg ²⁾

3. 実験方法

3. 1 実験配置

燃焼実験室（幅 15 m、奥行 15 m、高さ 15 m）の床面にケイ酸カルシウムボード（厚さ 5 mm）で作成した燃焼台に粘土で直径 1.6 m の円形土手を作成し、熱流束計を円形土手の端から距離 0 m、床面から高さ 1 m の位置に受熱面を円形土手の中心に向けて設置した。また、燃焼火炎の観察及び火炎高さ計測のため周辺にビデオカメラを設置した。

3. 2 実験条件

液体燃料散布状況を写真 1 に示す。

本実験では、安定した燃焼が得られるように、液体燃料散布量を 4 L（液厚：約 2 mm）とし、実験開始 30 秒前から円形土手内に散布を開始し、点火棒で実験試料に点火して実験を開始した。

開始時の燃焼実験室内の気温条件については 10℃、15℃、20℃、25℃の 4 条件とし、1 年を通じて気温が変わる時期にそれぞれの実験試料について 4 回ずつ実験を行った。各環境温度条件における実験開始時の気温を表 2 に示す。

実験試料は、液温を燃焼実験室内の気温と同じ温度にするため燃焼実験室が入る実験棟の保管室で保管した。燃焼台のケイ酸カルシウムボードは実験終了後に新品と交換した。



写真1 液体燃料散布状況

表 2 各環境温度条件における実験開始時の気温

環境温度条件	10℃	15℃	20℃	25℃
ガソリン	8.0℃	15.2℃	21.8℃	26.3℃
トルエン	9.2℃	15.2℃	21.5℃	28.0℃
酢酸エチル	10.7℃	14.8℃	21.4℃	28.1℃
アセトン	9.2℃	14.3℃	21.2℃	27.2℃

4. 実験結果

4. 1 実験試料の燃焼状況

ガソリンとトルエンは燃焼時大量の黒煙を伴う火炎ブルームを形成したが、酢酸エチル及びアセトン燃焼時の黒煙発生量は少なくなった。ガソリンは芳香族成分を多く含み、トルエンは分子中の炭素含有率が高いため大量の黒煙が発生し、酢酸エチル及びアセトンは分子中に酸素原子を含むため燃焼時の黒煙発生が少なくなったと考えられる。

蒸気圧が高く、揮発性が高いガソリンは、燃料散布後に発生した可燃性蒸気が周囲に拡散するため、点火直後、同蒸気に着火し、散布範囲の外に火炎が広がる現象が確認された。また、環境温度が上昇するに従い散布範囲外に広がる火炎の広がりが大きくなった。

4. 2 火炎高さ

火炎高さは、本実験時に記録した 1 秒間 30 フレームで記録されるビデオカメラ画像の火炎先端高さを画像処理により自動計測し、図 1 で示すように計測値 1 秒間の移動平均の値を平均火炎高さとした。また、本研究では、図 2 で示すように平均火炎高さの最大値の 80%となる時間帯を定常燃焼時間と定義した。

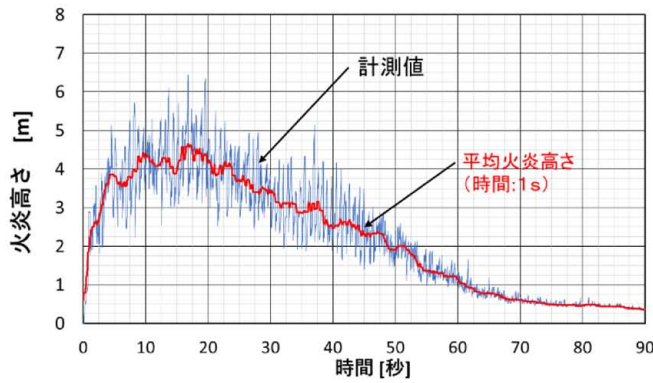


図1 平均火炎高さ

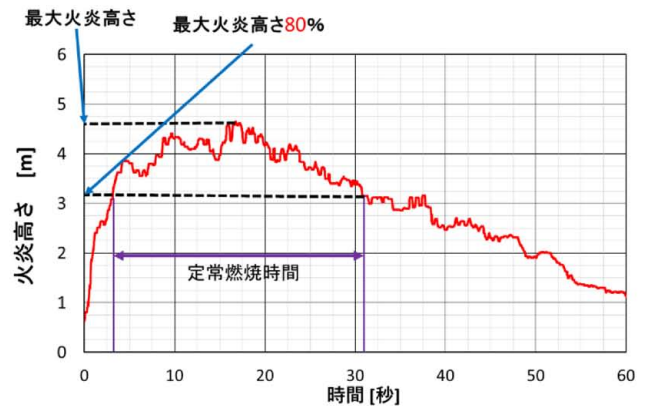
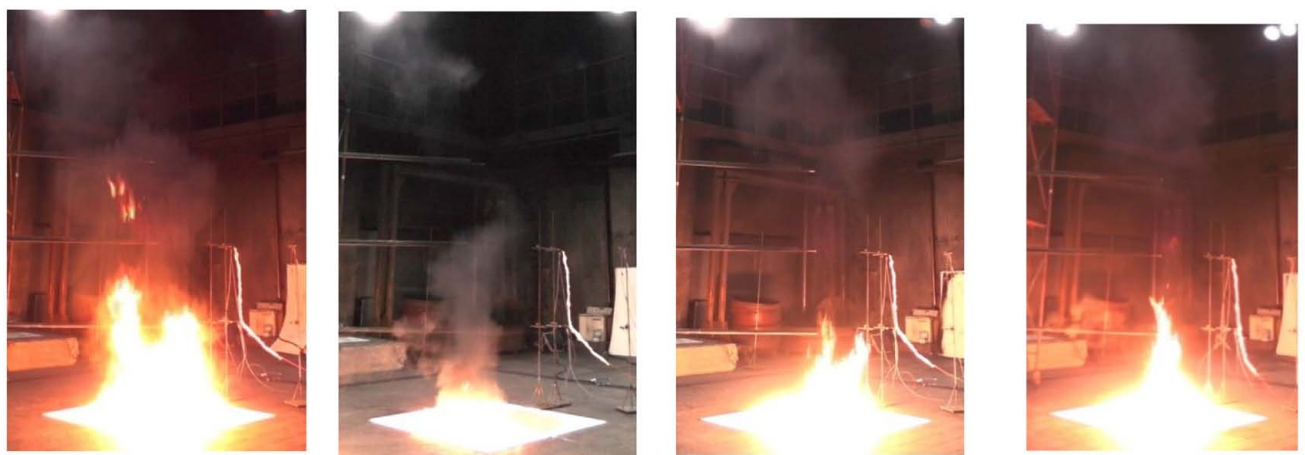


図2 定常燃焼時間

点火 2 秒後の火炎立ち上がり状況を写真 2 に、平均火炎高さの経時変化を図 3 にそれぞれ示す。



ガソリン

トルエン

酢酸エチル

アセトン

(a) 環境温度条件 10°C



ガソリン

トルエン

酢酸エチル

アセトン

(b) 環境温度条件 25°C

写真2 点火2秒後の火炎立ち上がり状況

表3 環境温度の変化による燃焼特性

燃焼特性	実験試料	10 °C条件	15 °C条件	20 °C条件	25 °C条件
火炎高さ 3 m 到達時間	ガソリン	3.2 秒	3.3 秒	1.5 秒	1.6 秒
	トルエン	6.6 秒	4.2 秒	3.6 秒	3.6 秒
	酢酸エチル	6.0 秒	5.1 秒	3.4 秒	5.2 秒
	アセトン	3.5 秒	4.2 秒	3.4 秒	1.6 秒
定常燃焼時間	ガソリン	24.5 秒	15.2 秒	21.1 秒	21.2 秒
	トルエン	36.3 秒	21.5 秒	38.3 秒	43.4 秒
	酢酸エチル	11.5 秒	21.2 秒	18.2 秒	29.8 秒
	アセトン	19.4 秒	25.1 秒	16.0 秒	21.1 秒
最高火炎高さ	ガソリン	6.44 m	5.90 m	5.94 m	6.72 m
	トルエン	5.17 m	5.85 m	5.68 m	6.02 m
	酢酸エチル	3.92 m	4.70 m	5.33 m	5.33 m
	アセトン	5.31 m	4.87 m	5.40 m	6.22 m

4. 3 発熱速度及び燃焼速度

火炎高さについて多くの研究があり、液体燃料火災時の平均火炎高さの見積りには次式で示す Heskestad の実験式が比較的頻繁に用いられている⁴⁾。

$$L_f = 0.23\dot{Q}^{2/5} - 1.02D \tag{1}式$$

ここで、 L_f は平均火炎高さ (m)、 \dot{Q} は発熱速度 (kW)、 D は火炎直径 (m) である。本実験では、実験試料燃焼時の重量減少速度を計測していないため実験から得られた平均火炎高さを (1) 式に代入することによって、発熱速度を導出した。求めた発熱速度の定常燃焼時間帯における平均値を表 4 に示す。ガソリンの発熱速度が一番高く、酢酸エチルが低くなった。酢酸エチルは、煤の発生量が少ないため液面が受ける火炎からの放射熱が小さく、さらに単位重量当たりの燃焼熱がトルエンに比べて低いため、発熱速度が低くなったと考えられる。また、全ての実験試料において環境温度条件 25°C の場合で発熱速度が高くなり、アセトンの発熱速度がトルエンよりも高くなった。

Heskestad の式を使用して求めた発熱速度と単位重量当たりの燃焼熱を使用し、単位面積当たりの重量燃焼速度を求め、定常燃焼時間帯における平均値を表 5 に示す。環境温度条件が 15°C 以下の場合では、ガソリンの燃焼速度が高くなったが 20 °C 以上の場合では、アセトンの燃焼速度が最も高くなった。

表 4 定常燃焼時間帯における平均発熱速度

環境温度条件	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C
ガソリン	2,850 kW	3,300 kW	2,870 kW	4,020 kW
トルエン	2,280 kW	2,480 kW	2,820 kW	3,230 kW
酢酸エチル	1,530 kW	1,840 kW	1,990 kW	2,410 kW
アセトン	1,990 kW	1,810 kW	2,410 kW	3,420 kW

表 5 定常燃焼時間帯における単位面積当たりの平均重量燃焼速度

環境温度条件	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C
ガソリン	33 g/m ² s	38 g/m ² s	33 g/m ² s	46 g/m ² s
トルエン	27 g/m ² s	29 g/m ² s	33 g/m ² s	38 g/m ² s
酢酸エチル	30 g/m ² s	36 g/m ² s	39 g/m ² s	47 g/m ² s
アセトン	32 g/m ² s	29 g/m ² s	39 g/m ² s	55 g/m ² s

4. 4 放射熱流束

定常燃焼時間帯における平均熱流束値を表 6 に、点火 90 秒間の実測熱流束を図 4 にそれぞれ示す。ガソリンを除く実験試料において環境温度が高くなるにつれ熱流束の立ち上がりは大きくなった。ガソリン、トルエンと比べ、酢酸エチル及びアセトンの平均熱流束が低くなった。酢酸エチル及びアセトンは、燃焼時煤の発生が少なかったため放射熱流束が低くなったと考えられる。ガソリンとトルエンでは、環境温度条件 15℃、20℃でトルエンの熱流束が高くなった。点火 10 秒間の放射熱流束は、ガソリンの熱流束値が一番高く、続いてトルエン、アセトン、酢酸エチルという順になった。点火後の熱流束の立ち上がりについては、ガソリンが一番高く、酢酸エチルが一番低くなった。

なお、実験開始から 30 秒以降に、放射熱流束の極大ピークがたびたび観測されたが、これは床に敷設したケイ酸カルシウムボードの爆裂によって火炎が熱流束計に接触したことによるものである。

表 6 定常燃焼時間帯における平均熱流束

環境温度条件	10℃	15℃	20℃	25℃
ガソリン	35 kw/ m ²	29 kw/ m ²	27 kw/ m ²	28 kw/ m ²
トルエン	25 kw/ m ²	36 kw/ m ²	29 kw/ m ²	27 kw/ m ²
酢酸エチル	16 kw/ m ²	16 kw/ m ²	14 kw/ m ²	18 kw/ m ²
アセトン	23 kw/ m ²	24 kw/ m ²	18 kw/ m ²	21 kw/ m ²

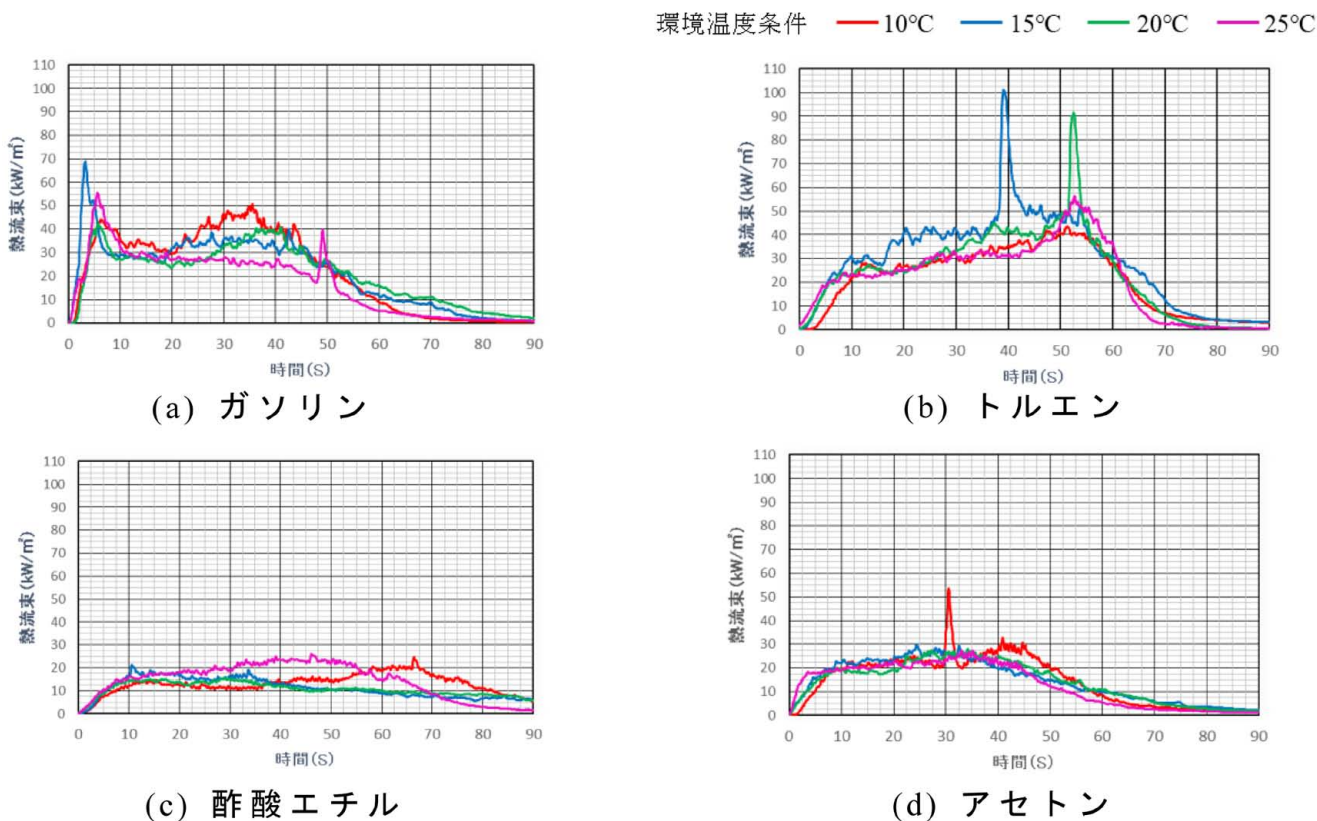


図4 点火90秒間の実測熱流束

5. 燃焼実験における実測熱流束に基づく火傷程度の予測

燃焼実験の結果から、引火性液体の種類や環境温度の違いによって、火炎周囲の熱流束が変化することが明らかとなった。そこで、引火性液体漏洩事故における除去作業等に従事する作業者の火災発生直後の火傷危険性評価を行うために、火炎周囲における実測熱流束データを用いて、Ⅱ度熱傷に到達する時間を予測する。

5. 1 火災発生時からⅡ度熱傷に至るまでに要する時間

引火性液体の漏洩事故が発生した場合に漏洩液体の除去作業に従事する作業者に対する火傷リスクを評価するこ

Stoll らによって、皮膚温度と損傷率（皮膚の損傷強さの時間変化率）の関係は、次式で表されている⁶⁾。

$$\frac{d\Omega}{dt} = P \exp\left(-\frac{\Delta E}{RT}\right) \quad (6) \text{式}$$

ここで、 Ω は損傷の強さ、 P は定数(=3.1×10⁹⁸)、 ΔE は活性化エネルギー(=150 kcal/mol)、 R は気体定数(=2 cal/molK)、 T は皮膚温度[K]である。

図5に示した皮膚下0.1mmの温度を(6)式に代入し、損傷強さの時間変化を計算し、図6に示す。

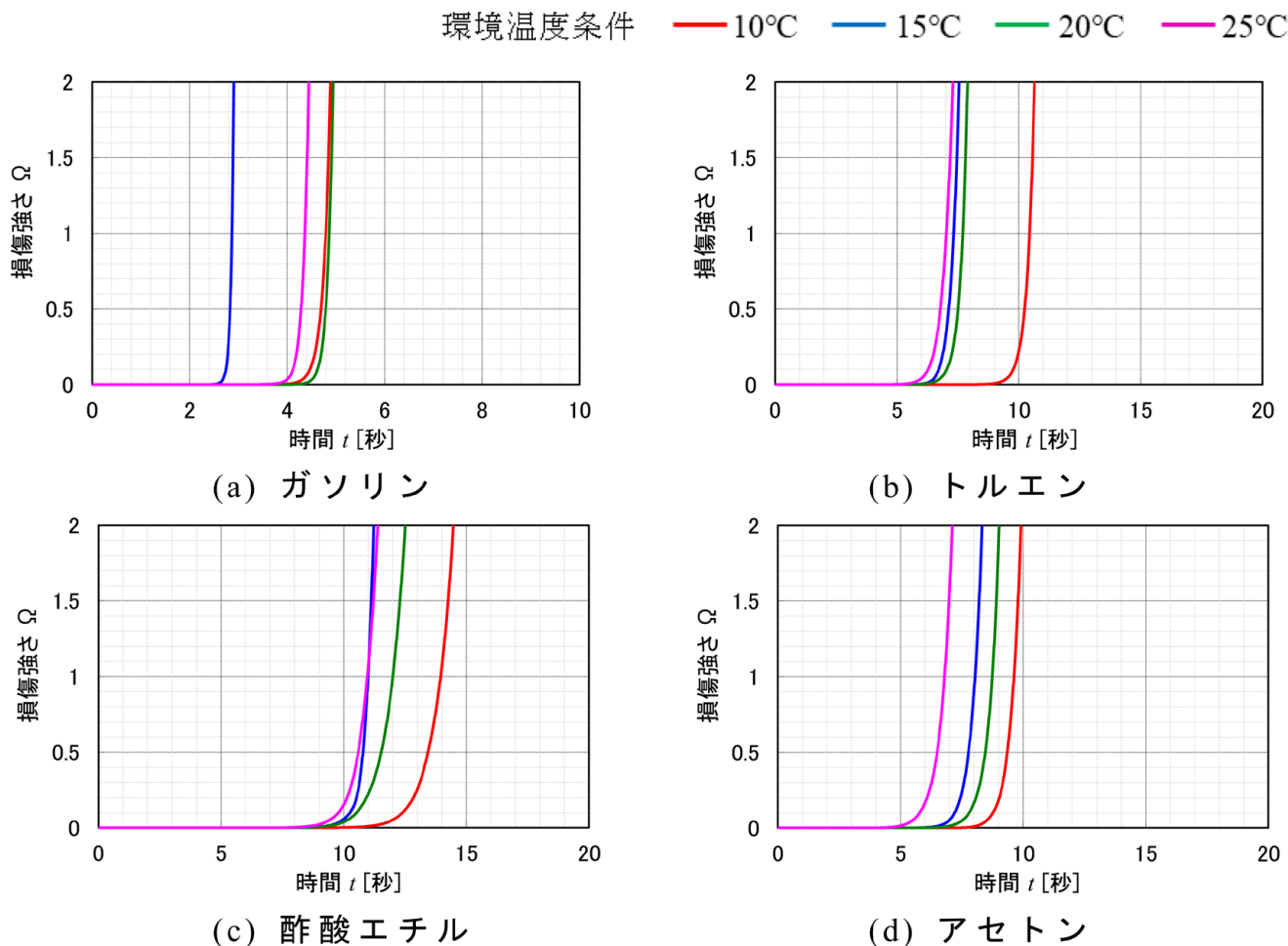


図6 皮膚下0.1mmの損傷強さの時間変化(火災縁から0m、高さ1m)

損傷強さ Ω が1に到達した時をもってⅡ度熱傷と判断されることから、図6から $\Omega=1$ となる時間を求めることによって、引火性液体火災の縁から0m、高さ1mの位置における作業員のⅡ度熱傷到達時間を予測することができる。予測したⅡ度熱傷到達時間を表7に示す。

表7 引火性液体火災縁0m、高さ1mの位置における予測Ⅱ度熱傷到達時間

環境温度条件	10℃	15℃	20℃	25℃
ガソリン	4.79 秒	2.87 秒	4.86 秒	4.36 秒
トルエン	10.43 秒	7.33 秒	7.69 秒	7.03 秒
酢酸エチル	13.95 秒	10.99 秒	12.00 秒	10.96 秒
アセトン	9.62 秒	8.04 秒	8.73 秒	6.79 秒

ガソリンの火災直近では 5 秒以内にⅡ度熱傷を負うことが予測されたが、酢酸エチルの火災直近では、Ⅱ度熱傷に到達するまでの時間が 10 秒以上かかることが予測された。また、ガソリン以外の試料では、環境温度の上昇につれてⅡ度熱傷到達時間も短くなることが分かった。

5. 2 定常燃焼時においてⅡ度熱傷に至るまでに要する時間

引火性液体の火災が発生した場合における消火活動従事者に対する火傷リスクを評価することを目的として、火災周囲、高さ 1 m の位置での定常燃焼時における平均熱流束値を用いて、Ⅱ度熱傷に到達する時間を予測する。

皮膚下 0.1 mm の温度は、初期温度が T_0 であった半無限固体において、表面 ($x = 0$) が一定の熱流束 I に曝されることによる温度上昇から計算できる。固体内部の温度 T は位置 x と時間 t の関数で表される⁴⁾。

$$T = \frac{2I}{k} \left\{ \sqrt{\frac{at}{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4at}\right) - \frac{x}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) \right\} + T_0 \quad (7) \text{式}$$

(7) 式に、火災周囲、高さ 1 m の位置での定常燃焼時における平均熱流束値を代入することによって、皮膚下 0.1 mm の温度上昇を求めた。さらに、導出した皮膚下 0.1 mm の温度を (6) 式に代入し、損傷強さの時間変化を計算した。損傷強さ Ω が 1 に到達する時間を求めることによって、引火性液体火災時に火災周囲で消火活動等に従事する作業員のⅡ度熱傷到達時間を予測することができる。予測したⅡ度熱傷到達時間を表 8 に示す。

表8 定常燃焼時においてⅡ度熱傷に至るまでに要する時間予測

火災縁からの距離	引火性液体	10℃条件	15℃条件	20℃条件	25℃条件
0 m	ガソリン	1.8 秒	2.4 秒	2.7 秒	2.5 秒
	トルエン	3.1 秒	1.7 秒	2.4 秒	2.7 秒
	酢酸エチル	6.1 秒	6.1 秒	7.9 秒	5.0 秒
	アセトン	3.5 秒	3.3 秒	5.2 秒	4.1 秒
1 m	ガソリン	14.6 秒	14.2 秒	16.5 秒	14.1 秒
	トルエン	19.4 秒	10.6 秒	16.1 秒	18.3 秒
	酢酸エチル	56.0 秒	54.5 秒	56.0 秒	45.4 秒
	アセトン	33.3 秒	29.3 秒	39.1 秒	31.2 秒
2 m	ガソリン	33.2 秒	29.9 秒	38.4 秒	35.3 秒
	トルエン	43.3 秒	25.1 秒	38.4 秒	41.5 秒
	酢酸エチル	148.3 秒	145.3 秒	154.7 秒	123.4 秒
	アセトン	88.0 秒	74.2 秒	92.2 秒	78.9 秒

定常燃焼時の火災によってⅡ度熱傷に至るまでに要する時間は、環境温度の違いによって有意性のある差異は認められなかった。定常燃焼時には、火災からの伝熱によって液体温度が加熱されることから、環境温度の違いによる影響が現れなかったと考えられる。火災縁からの距離 0 m では、Ⅱ度熱傷到達時間が 8 秒以内と短いことから、火傷リスクが極めて高いことが認められた。距離 1 m では、ガソリンとトルエンの燃焼時にはⅡ度熱傷到達時間が定常燃焼時間よりも短く火傷リスクが高いのに対し、酢酸エチルとアセトンの燃焼時には、定常燃焼時間に比べてⅡ度熱傷到達時間が長いことから、火傷リスクが低いと考えられる。距離 2 m では、火災周囲の放射熱流束が最も高いガソリンの燃焼時であっても、Ⅱ度熱傷到達時間が定常燃焼時間よりも十分に長いことから、火傷を負う危険性が低いことが明らかとなった。

6. まとめ

引火性液体を実験試料とした燃焼実験を異なる環境温度条件下で実施することによって、ガソリン以外の実験試料において環境温度の変化により、引火性液体燃焼時の火災高さや放射熱流束、定常状態の継続時間が変化することが明らかとなった。環境温度が低くなれば実験試料に点火した直後の火災の立ち上がりに差異が確認でき、引火点や沸点が高いほど火災立ち上がりの遅れが顕著となった。また、引火性液体の種類や環境温度の変化により、燃焼性状が異なるという実験結果をふまえて、引火性液体火災発生時における火傷程度の予測を行うことで、引火性液体漏出事故が発生した場合の防

止活動に従事する作業員や消火活動従事者の危険性予測を行うことが可能となった。

引火性液体を取扱う場所や周囲の環境状況、貯蔵室内の温度等を考慮した事故防止対策や引火性液体の種類毎の燃焼特性を考慮した保管、管理は、火災危険性の軽減に必要不可欠であり、火災発生時に作業員等が受ける火傷リスクを適切に評価するためには、保存場所の環境温度に影響される引火性液体の危険性を正確に予測しなければならない。本論文が、危険物事故防止対策に少しでも役立ち、危険物事故の防止活動に従事する作業員の受傷事故を1件でも減らすことに貢献できれば幸いである。

参考文献

- 1) 藤本純平ら：環境温度の変化による引火性液体の燃焼性状，第54回安全工学研究発表会講演予稿集，pp.175-178，2021
- 2) 難波桂芳監修：爆発防止実用便覧，サイエンスフォーラム，1983
- 3) Okamoto: Induced fire hazard by gasoline spills, Fire Safety Journal, 120, 103112, 2021
- 4) 田中哮義：第3版建築火災安全工学入門，日本建築センター，2020
- 5) 渡部勇市：サーマルマネキンを用いた防火衣の火災暴露実験(その2)－燃焼状況，流入熱流束および火傷分布の推定－，消防研究所報告，pp.9-18 (1988)
- 6) Stoll, A. M. and Greene, L. C.: Relation between Pain and Tissue Damage due to Thermal Radiation, J. Appl. Physiol., Vol.14, pp.373-382 (1959)