

混合液体の引火点の測定[†]

水谷 高彰*1, 佐藤 嘉彦*1, 八島 正明*1

引火点は可燃性液体を安全に取り扱う上で重要な指標の一つである。引火性が危惧される物質は、引火点未満で取り扱うか、着火源を排除しないと爆発・火災の危険性がある。引火点の測定方法は JIS 等に定められており、それぞれの測定方法に適応範囲が定められている。純物質や単純な炭化水素混合物（石油蒸留製品など）では、適応範囲で測定していれば、測定方法の違いによる測定結果の差異は小さい。しかし、労働災害調査の結果から、産業廃液などで散見される高粘稠液体に微量の揮発成分が含まれる混合液体や、水で希釈された可燃性液体の場合、測定方法の違いにより測定値が大きく異なる場合があることが分かった。このことは、混合液体の引火点測定において、十分検討せず測定方法を選択した場合、得られた引火点未満でも爆発・火災危険性があることを示す。そこで本研究では、引火点本来の定義である引火性が無くなる温度により近い温度を測定する方法について、その手法の自動化について検討すると共に、廃液状の可燃性液体を測定対象例として JIS 等で定められている引火点測定方法との測定値の差違について考察した。

キーワード: 引火点, 産業廃棄物, 混合物, 測定法

1 はじめに

引火点は可燃性液体を安全に取り扱う上で重要な指標の一つである。引火性が危惧される物質は、引火点未満で取り扱うか、着火源を排除しないと爆発・火災の危険性がある。このため、消防法をはじめとして、引火性が危惧される物質の取り扱いに関する各法令では、引火点の違いにより取り扱う条件が定められている。

ところが、著者らが行った爆発・火災による労働災害の調査では、原因物質を法令等に定められた手法で引火点を測定し、測定された引火点未満で管理していたにもかかわらず、爆発・火災が発生したと推定される事例がある。廃棄物処理や設備の解体作業などで見られるこれらの災害事例¹⁾では、原因物質が高粘稠液体であったり、多種微量成分を含みその成分が未知のまま取り扱われていたことが多い。

引火点は、その物質の基本的な物性から推算する方法が開発されている。一般に化学構造が類似した物質ではその物性に法則性があるので、取り扱う化学物質の成分や組成が明らかであれば、その基本的な物性を実際に測定せずとも SDS (安全データシート) などの文献値や文献値から推算した値を参考値として利用することで、引火点を推算できる²⁻⁸⁾。

しかし、廃棄物などは多種多様な成分を含む混合物であり、その組成も明らかでないことが多い。そのためその引火点の推定は一般に困難であり、実際に測定を行なって引火点を測定する必要がある。また、ハロゲン化合物や水を含む引火性液体などは、難引火性を示し、測定方法によって、引火性なしと判定されたり、引火点の測定値に大きな違いが生じたりすることが知られている。したがって、これらの試料の引火点測定については、試料の特性に応じて複数の測定方法を併用するなど、慎重に測定する必要があることが指摘されている⁹⁾。

そこで本研究では、廃液を模した数種類の可燃性液体について、JIS 等で定められた引火点測定方法とより引火点の本来の定義に近い測定方法とを用いてそれらの測定値の差違を検討した。また、その手法の自動化についても検討した。

2 引火点

引火点とは可燃性液体の液面上の蒸気濃度が燃焼範囲 (=爆発範囲)に達しうる温度である¹⁰⁾。液体の蒸気圧は、一定温度の密閉容器内では時間と共に飽和蒸気圧に近づく。また、この飽和蒸気圧は温度の上昇と共に増加する。換気の悪い室内や装置内、容器等に可燃性液体を入れ放置した場合、可燃性蒸気が発生し、蒸気圧は最大で飽和蒸気圧まで上昇する。一方、可燃性蒸気には爆発範囲という物性値があり、蒸気圧がある範囲にある場合にのみ、火炎が伝ばできる。すなわち、飽和蒸気圧が爆発範囲下限となる温度以上でない、爆発範囲の可燃性液体蒸気は形成されない。このような理由で、着火する下限温度

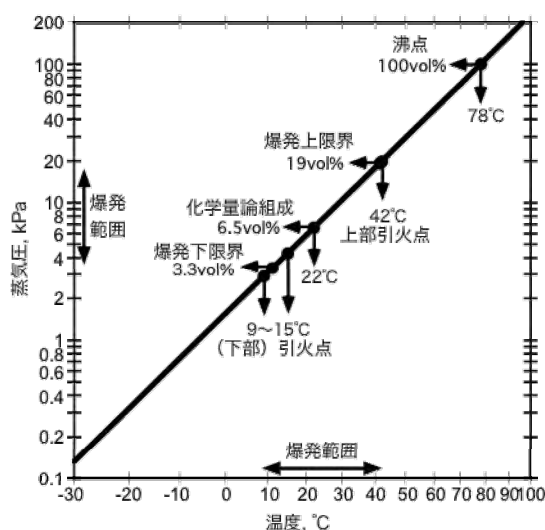


図1 エチルアルコールの飽和蒸気圧と引火点および爆発範囲¹¹⁾

[†]第45回安全工学研究発表会(2012年11月30日, 東京)で内容の一部を発表

*1 化学安全研究グループ.

として引火点が測定される。エチルアルコールを例に、飽和蒸気圧と引火点、爆発範囲の関係を図1に示す。

引火点を測定する場合、温度を変えて、着火試験を行い、着火する最低の温度を確認する。蒸気圧は密閉容器内では時間と共に温度によって決まる飽和蒸気圧に近づく。このため引火点の測定では、試料を密閉容器に均一温度で保持して飽和蒸気を作り、その飽和蒸気に対して着火試験を行うことが重要である。しかし、実際に引火点を測定する際、これらの条件を完全に満たすことは下記の理由で困難である。このため、JIS等で規定されている測定方法では、測定される引火点への影響が最小となるよう、適用条件などが定められている。引火点測定に影響を与える主な因子を以下に列挙する。

1) 密閉容器

密閉容器を用いることは容器の破裂などの危険性の問題がある。また多くの引火点測定装置では確実に着火するため着火装置にガス燃焼による小炎を用い、小窓から引火を試みる方式を採用している。これらの制約から、規格化された密閉式の引火点測定では開閉装置を備えた半密閉容器を用いる。開閉部で蒸気が散逸すると、揮発成分が失われ、試料の組成が変わったり、設定した条件より蒸気圧が低濃度になったりする。このため引火するはずの設定温度でも引火しない（すなわち引火点の測定値が上昇する）ことがある。

2) 均一温度での保持

引火点測定では温度を変えて何度も着火試験を行う必要がある。温度を変える度に測定部全体の温度が均一になるまで待つと測定にかかる時間が長くなる。このため、一部を除き規格化された引火点測定では温度を一定速度で上昇させながら測定する。結果、測定容器内に温度分布が発生し、設定温度と異なる温度で着火試験することとなり、引火点の測定値を変化させる。

3) 飽和蒸気の形成

容器を仮に均一温度にしたとしても、蒸気圧が上昇し、飽和蒸気を形成するまでには時間がかかる。引火点を測定する上で飽和蒸気と同等と見なせる蒸気を形成するまでの時間は容器の形状や大きさ、攪拌状態等によって異なるが、静置状態で20mlの容器で2分(JIS K2265-2)、400mlの容器では30～60分¹⁾程度の時間が必要である。しかし、タグ密閉法やペンスキーマルテンス密閉法では、それぞれ50ml、70mlの試料を用いるので飽和蒸気と同等の蒸気を形成するために数十分程度の時間が必要であるにもかかわらず、実際には設定温度まで昇温後直ちに着火試験を行なうので、蒸気が飽和状態に達していない。このような状態で着火試験を行なうことは、測定温度より低い温度での飽和蒸気圧までしか蒸気圧が上昇しないことを意味し、結果、引火点の測定値を上昇させる。

4) 大気圧

組成比で示した爆発範囲は標準気圧(101.3kPa)付近では圧力の影響をあまり受けない。また飽和蒸気圧は温度の関数であり、これも標準気圧付近では大気圧の変動の影響をほとんど受けないので、同じ温度で大気圧が異なると可燃性蒸気の分圧が変動し、組成比が変わる。このため、引火点の測定には標準気圧を用い、引火点を用いて安全対策等を行う場合には、大気圧を考慮して補正する必要がある⁹⁾。密閉容器を用いた引火点測定装置では、測定圧力を比較的自由に設定することが可能であるが、半密閉型や開放型の容器では、測定時の大気圧と異なる気圧で測定することは困難である。このため、JIS K2265では、大気圧が標準気圧(101.3kPa)から1kPa昇圧する度に0.25℃引火点が増加するとして(厳密に適用できるのは98.0～104.7kPaの範囲)、大気圧の補正をするように示されている。

5) 試料量

必要な試料量は少ないほどコストがかからない。また試料量は少ないと温度を均一にすることが容易になり測定上都合がよい。しかし、試料量が少ないと、容器の汚れや空気中の湿気などの混入物の影響を受けやすい。また試料が混合物の場合には、各成分の蒸気圧に応じてそれらの蒸発量が異なるため、試料が少ないと蒸発による試料溶液の組成比の変化が大きい。したがって組成比を変えずに測定をすることが難しい。

また、引火点付近の狭い温度範囲で、可燃性液体の蒸気は上方にしか火炎が伝ばしない性質を示すことがある。裸火を上方から近づける測定方法では、下方に伝ばしない状況では引火せずと判定されるが、この状況は蒸気が爆発範囲に達していないとは言い難い。

JIS等では試料の性状に応じ、正確性と利便性のバランスをとった測定方法が規格化されている。測定される引火点は少なからず測定装置の構成や測定条件に影響を受けるため、一般には引火点とは規格化された測定方法で測定されたものを示す。

3 実験

1) 試料

実験には以下に示すa)～d)の4系統の試料を用いた。

a) 純物質5種類

装置の特性を確認するため、引火点10～90℃の可燃性液体の中から、親水性(極性)液体として2種のアルコール(1-ブタノール、2-エチル-1-プロパノール)、親油性(非極性)液体として3種の直鎖状炭化水素(オクタン、デカン、ドデカン)を選んだ。

b) 模擬水溶性廃液3種類

可燃性液体が付着した機器を水で洗浄した際に生じる廃液を想定し、水溶液とした。相溶性が無い混合物は引火点測定の際、試料の取り扱いに特段の

表1 引火点測定法

	測定法	適応範囲	加温方法	装置
A	タグ密閉法 (JIS K2265-1:2006)	引火点が 93℃以下の石油製品及び関連製品	水浴	田中科学機器製作株式会社製 ATG-5
	迅速平衡密閉法 (JIS K2265-2:2007, ISO 3679:2004)	引火点が-30～300℃の石油, 塗料, ワニス, 塗装バインダー, 接着剤, 溶剤, 脂肪酸メチルエステル及びこれらの関連製品	ヒーター加熱	STANHOPE SETA 社製 30000-0
	ペンスキーマルテンス密閉法 (JIS K2265-3:2007, ISO 2719:2002)	引火点が 40℃を超える可燃性液体, 固体懸濁物質を含む液体, 試験条件において表面に薄膜ができやすい液体及びその他の液体	ヒーター加熱	田中科学機器製作株式会社製 APM-7
B	静置法(改良型)	引火点が 0～100℃の液体	水浴	自作

注意が必要なことから, 水と相溶性があるエタノール, 2-プロパノール, 及び酢酸を可燃性液体に選んだ。

c) 廃油 1 種類

精密機器製造会社から特別管理廃棄物(引火点 70℃未満)に該当しないとして排出された油状の廃液を選んだ。この WDS(廃棄物データシート)には可燃性との記載があった。

d) 模擬廃油 1 種類

高粘稠の模擬廃油として, 同一性状の試料の入手が容易な重油硫黄分標準物質(硫黄分 2.04wt.%, ペンスキーマルテンス A 法による引火点 99.0℃)を標準重油として用い, 重油と相溶性がある揮発性可燃性液体として, ヘプタンを選んだ。

2) 測定方法

本実験で採用した引火点測定方法とその概要を表 1 に示す。

A) 既存の測定方法

JIS K2265 には 4 つの引火点測定方法が記載されている。これらの測定方法の内, 3 つの測定方法では, 表 1 に示した市販の測定装置を用い, JIS に定められた手順で測定を行ない, 適応範囲の引火点が測定された測定法を比較対象とした。JIS に定められた測定方法の特徴は下記の通りである。

・ JIS K2265-1: タグ密閉法

タグ密閉法は密閉容器に入れた試料液体を水浴等にて 1 分間に 1℃ (60℃以上では 3℃) の割合で昇温し, 0.5℃おき (60℃以上では 1℃おき) に密閉容器覗き窓を開いて試験炎を近づけることにより引火を試みる。常温付近の引火点が簡便に測定でき, 揮発成分を含む試料の測定も開放法に比べ正確に測定できるため, 多用されている。高粘稠液体や相分離した試料は測定できない。引火点より 3～7℃低い温度から引火を試みなくてはならない。このため, 微量の揮発成分を含む場合には, 再現性を高めることが難しい。

・ JIS K2265-2: 迅速平衡法

迅速平衡法は密閉容器に入れた試料を一定温度で 1 分間保持し, 密閉容器覗き窓を開いて試験炎を近づけることにより引火を試みる。装置が簡単で広い温度範囲の引火点が測定できるが, 引火を試みる度に試料を交換する必要があり, 手間がかかる。

・ JIS K2265-3: ペンスキーマルテンス密閉法

ペンスキーマルテンス密閉法はタグ密閉法と似ているが, 水浴を使用せず, 試料の攪拌装置が追加されている。高い引火点や, 高粘稠液体, 相分離しやすい液体を測定できるが, 40℃以下の引火点は測定できない。

・ JIS K2265-4: クリーブランド開放法

JIS K2265 で定義された引火点測定法のうち, 唯一の開放法であるクリーブランド開放法では, 燃焼点(引火後, 燃焼が持続できる最低温度)が測定できるが, 引火性成分を微量にしか含まないサンプルを用いた場合, 引火性成分が散逸してしまい正確な引火点測定が難しいと判断したため, 本研究では採用しなかった。

B) 改良測定法の試み

引火点本来の定義により近づけた測定方法として, 柳生らが提唱した静置法¹¹⁻¹³⁾を部分燃焼や上方のみへの火炎伝ばなどを測定できるように改良した測定法で測定を行った。改良した点は, 観測窓と圧力センサー, 熱電対の追加による引火判定の多様化と, 容器容量および試料量の増加による気化での液体組成変化の鈍化である。改良した静置法の概要を図 2 に示す。

測定手順は以下の通りである。まず, 水浴に浸漬した容積 600ml の半球形の密閉容器に試料液体 100ml と攪拌子を入れ, 試料液体を所定の温度に維持して 10 分間以上攪拌した後, 攪拌を止め, 約 3mm の電極間に 16kV, 45mA の高電圧発生装置を 0.1 秒間接続して発生した放電で, 着火を試みた。直径 1mm の熱電対による 5℃以上のガス温上昇の検知, 観測窓からの発光目視, 圧力計で

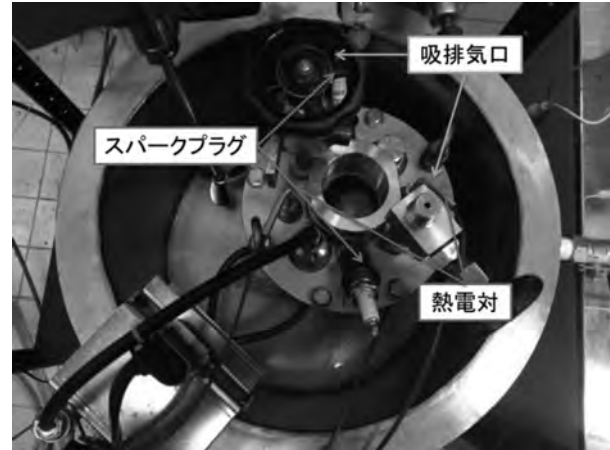
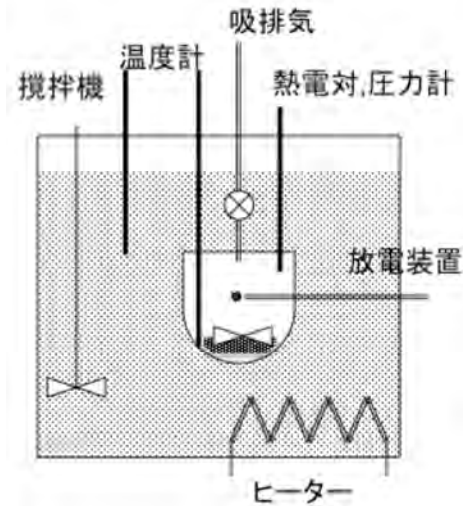


図2 改良型静置法装置概要

の10kPa以上の昇圧のいずれかが確認されるか否かで引火を判断した。引火しなかった場合には設定温度を1℃上げて、再度着火試験を行い、引火が観測されるまで設定温度を上げた。

改良した静置法は、現在のところ自動化されておらず、熟練技術者による測定が必要である。そこで、適切な実験条件や着火判定条件の洗い出しや、多数の試料を測定する際の効率化を目指して、自動制御装置の開発も試みた。改良した静置法では制御する必要がある機器には、冷却・加温装置、攪拌装置、各種弁、着火装置(放電装置)があり、測定装置として温度、圧力、受光素子などがある。当初、小型PCなどの高性能電子機器での制御装置を試作し実験を試みたが、放電装置で発生する高電圧もしくは高出力電磁波の遮蔽が十分に出来ず、高性能電子機器が誤動作を繰り返したので、断念した。そこで、工業用の耐電圧の高い制御装置や測定装置を用いた制御装置を試作したが、正確な引火点測定のためには精度0.1℃以上の温度制御と、着火判定を行うために10ms程度の時間分解能がある記録装置の制御が必要であるが、十分な性能が得られなかった。また、装置内で爆発を起こす必要があるため、安全性の保証が困難に

なり、多くの制御装置製作会社が製作を断念した。さらに、装置全体のコーディネートについても制御装置製作の専門家からの助言が得られなかったこともあり、制御装置や測定措置の耐電性能が向上し、開発環境が整備されるまで自動制御装置の開発は見送ることとした。

4 結果と考察

1) 純物質

a)純物質5種類の引火点測定結果を表2に示す。純物質の場合、タグ密閉法より迅速平衡法の方が低い引火点を示し、今回測定した試料では最大3℃の差があった。2章の「飽和蒸気圧の形成」の項で述べた通り、飽和蒸気の形成を待ち着火する迅速平衡法は昇温しながら着火するタグ密閉法より飽和蒸気圧に近い(すなわち高濃度の)蒸気を形成できるため、このような結果となったと考えられる。

2) 模擬水溶性廃液

次にb)模擬水溶性廃液3種類の引火点測定結果を表3～5に示す。水溶液の引火点は、可燃性液体の濃度が高い領域では静置法による引火点が最も低くなった。その差は最大4℃であり、純物質の結果と比べやや大きい

表2 a)純物質引火点測定結果

	1-ノタンノール	2-エチル-1-ノタンノール	ノタンノール	デカン	ドデカン
タグ密閉法, °C	38.0	29.5	12.5	50.5	80.0
迅速平衡密閉法, °C	35.0	28.0	11.5	49.0	78.0
ペンスキーマルテンス密閉法, °C	-	-	-	49.0	81.0

※適応範囲外

表3 b)模擬水溶性廃液引火点測定結果 (エタノール水溶液)

エタノール濃度, wt%	1	2	3	4	5	10	20	40	60	80	100
タグ密閉法, °C	x	x	70.0	64.0	60.0	47.5	34.0	26.5	22.5	19.0	13.0
迅速平衡密閉法, °C	72.0	70.0	68.0	62.5	58.0	45.0	33.0	26.0	21.5	19.0	13.0
静置法, °C	x	x	x	x	65.0	49.6			25.7		9.4

x:引火せず

表4 b)模擬水溶性廃液引火点測定結果 (2-プロパノール水溶液)

2-プロパノール濃度, wt%	1	2	3	4	5	10	20	40	60	80	100
タグ密閉法, °C	x	x	56.0	52.0	50.0	38.0	30.0	22.5	22.5	21.0	16.0
迅速平衡密閉法, °C	x	62.0	54.0	50.0	46.0	37.5	27.5	22.5	22.5	20.5	14.0
静置法, °C	x	x	x	x	55.4	43.5					12.0

x:引火せず

表5 b)模擬水溶性廃液引火点測定結果 (酢酸水溶液)

酢酸濃度, wt%	75	80	85	90	95	100
タグ密閉法, °C	x	x	x	60.0	55.0	40.5
迅速平衡密閉法, °C	x	55.5	50.0	49.0	45.5	38.0
静置法, °C	x	51.9		48.1		36.8

x:引火せず

表6 c)廃油およびd)模擬廃油引火点測定結果

	廃油		模擬廃油	
	A	B	0wt.%	1wt.%
タグ密閉法, °C	87	-	-	61
迅速平衡密閉法, °C	105	140	102	90
ペンスキーマルテンス密閉法, °C	76	113	98	68
静置法, °C	96	-	-	80

-:適応範囲外

値となった。タグ密閉法とペンスキーマルテンス密閉法では引火点を測定する前に何度も着火を試みるため、試験炎により発生した微量の水分や空気中の微量の水分が試料に混入する。確認のため、純エタノールを用いた静置法および迅速平衡密閉法で引火が確認された後、試料の交換を行わずに再度測定を行った場合、回数を重ねるに従い、引火点の上昇（静置法3回目で+3°C、迅速平衡密閉法3回目で+2°C）が観測された。また、純エタノールに微量の水分（1wt%）を混入して静置法で測定したところ、他の測定法と同程度（12°C）の引火点が得られた。これらの結果から、可燃性液体の濃度が高い領域で静置法による引火点が最も低くなった主な理由は、着火試験により発生する水分の影響であることが確認された。

また、上方のみ火炎が伝ばする現象を、静置法では引火と判定するが、静置法以外では引火せずと判定する。この現象は引火点付近の温度での試験で確認され、この際の圧力上昇は数十 kPa と極めて小さい。このことも可燃性液体の濃度が高い領域で静置法による引火点が最も低くなった理由と考えられる。

一方、可燃性液体の濃度が低い領域では迅速平衡法による引火点が最も低く、最も希薄な溶液まで引火点を測定できた。今回用いた測定法の中で、迅速平衡法と静置法では着火を試みる度に試料を交換し、タグ密閉法とペンスキーマルテンス密閉法では着火が認められるまで試料を交換しない。可燃性液体の濃度が低い領域では、着火を試みるだけで可燃性蒸気を消費してしまい、タグ密閉法とペンスキーマルテンス密閉法では引火点を測定できなかったと考えられる。可燃性液体の濃度が低い領域で静置法が引火点を測定できない理由は、容器の大きさによる温度不均一性など、原因はいくつか挙げできるが、主要因は現在のところ、明らかになっていない。

3) 廃油と模擬廃液

c)廃油とd)模擬廃油（重油混合物）の引火点測定結果を表6に示す。いずれの試料でも迅速平衡法よりペンスキーマルテンス密閉法の方が低い引火点を測定した。廃油や模擬廃油には、揮発成分が微量しか含まれていないため、迅速平衡法では試料が少なすぎて飽和蒸気圧を形成できなかったと推定される。

4) 試料管理状態の影響

試料の取り扱いにより、試料が変質し引火点が変わってしまうため、JIS K2265 では測定法により引火点より10～56℃低い温度で試料を保管することを要求している。しかし、実際の試料では引火点は測定するまで未知であり、低温管理状態は保証されていない。そこで、引火点付近までの加温で引き起こされる試料の変質による引火点の変化を確認するため、試料を交換すべきところを、試料を交換せずに測定し、測定される引火点への影響を調べた。多くの条件では、引火点-20℃～引火点+10℃の範囲での加温(測定法にもよるが10～30分程度)では、JIS K2265 で許容されている差しか測定されなかったが、一部の条件で大きな差異が認められた。今回測定した中で最も顕著な例は、重油(模擬廃油 0wt.%)をペンスキーマルテンス密閉法で測定した場合で、4回の測定(約2時間の測定)で測定値が98℃から6℃下がって92℃になった。原因となる成分の変化を測定することは難しく、測定による確認はできなかったが、加温により微量の揮発性の分解物が生成されたのではないかと推定された。低下した引火点は、試料そのものの引火点とは言い難いが、保管状況によって、測定時より引火点が下がる可能性を示唆しており、火災爆発危険性を検討する場合、留意が必要である。

5 おわりに

本来、引火点とは、試料の飽和蒸気が空気と混合して、希薄側の爆発限界条件の可燃性混合ガスを形成する温度である。このため、正確な測定には、(1)測定容器内の温度が均一であること、(2)試料と飽和蒸気が平衡状態にあること、(3)試料の気化により試料の組成が変化しないこと、(4)可燃性混合ガスの引火方法が妥当であることが重要である。また、安全性や利便性の観点から、(a)少量の試料で測定できること、(b)測定に必要な時間が十分短いことも満たされていることが望ましい。廃油Aや希薄エタノール水溶液、ヘプタン重油溶液ではこれらの条件、特に(3)を満たすことが困難なため、測定方法によって異なる結果を得たと考えられる。また、廃油と重油では引火点の低下が見られたことから、引火点測定のための昇温によって分解反応が促進され、新たな揮発成分が生成している可能性についても検討する必要がある。これらの結果から、廃液状物質の引火点は1つの測定法で測定しただけでは過小評価する危険性があると結論づけられた。特に、希薄溶液では迅速平衡法による引火点の確認を、廃油などでは一度加温した後、引火点が変わらないか確認する必要がある。

参 考 文 献

- 1) たとえば、失敗知識データベース。廃水中和処理槽の改修工事における電動グラインダの火花による爆発、<http://www.sozogaku.com/fkd/cf/CC0200119.html>、(最終閲覧 2015年1月14日)
- 2) 鈴木孝弘, 太田口和久, 小出耕造. 主成分分析法による有機化合物の引火点と化学構造との相関, 化学工学論文集; 16(6); 1224-1233; 1990
- 3) Affens, W. A. Flammability properties of hydrocarbon fuels, J. Chem. Eng. Data; 11; 197-202; 1966
- 4) Zabetakis, G. M. Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapors, Bulletin 627, US Bureau of Mines; 1965
- 5) Gmehling, J. and Rasmussen, P. Flash points of flammable liquid mixtures using UNIFAC, Ind. Eng. Chem. Fundam.; 186-188; 1982
- 6) 中野康英. エマルション燃料の引火点の推算-相平衡関係に活量係数を考慮して-, 安全工学, 29(2); 77-82; 1990
- 7) Green, W. D. and Perry, H. R. Perry's chemical engineers' handbook 8th Ed, McGraw-Hill; Chap.2; 515; 2007
- 8) Poling, B. E., Prausnitz, J. M. and O'Connell, J. P. The Properties of Gases and Liquids (5th Ed.), McGraw-Hill; 2001
- 9) 八島正明. 産業現場における火災・爆発災害とGHS分類—引火性液体と可燃性固体の場合—, 労働安全衛生総合研究所特別研究報告 SRR-No40-1-1; 2010
- 10) 大木道則ら編, 化学大辞典 第一版, 東京化学同人; 1989
- 11) 柳生昭三. 引火温度と爆発限界の関係線図(第1集), 産業安全研究所安全資料 RIIS-SD-86; 1986
- 12) 柳生昭三. 引火温度と爆発限界の関係線図(第2集), 産業安全研究所安全資料 RIIS-SD-87-2; 1987
- 13) 松井英憲, 大塚輝人, 高木優. 可燃性液体の引火温度範囲, 災害の研究, 28 :297-309; 1997