

# におい物質を利用した変電所における電気火災検知 の基礎的検討

潮木 知良\* 川崎 たまみ\* 京谷 隆\* 赤木 雅陽\*\*

## A Basic Study on the Detection of Electrical Fire in the Substation by Detection of Odor Substances

Tomoyoshi USHIOGI Tamami KAWASAKI  
Takashi KYOTANI Masataka AKAGI

In order to detect electrical fire by detection of odor substances released during overheating, we investigated the kinds of volatile substances which are released from the insulator during overheating, and the relationship between the emission from the insulator and the heating temperature. As a result, it was found out that the volatiles released from the insulator during overheating is the plasticizers mixed in the substrate, and they are released rapidly at 100°C ~ 150°C, lower than the temperature at which the insulator is burn out. In addition, we have confirmed that the volatiles released during overheating can be detected by a gas sensor that can detect low concentration of volatiles.

キーワード：変電所，ケーブル，電気火災，揮発性物質

### 1. はじめに

変電所における電気火災を早期に検知するため、電流値監視やサーモラベルの利用など、これまでに様々な対策が講じられてきた。しかし、火災の原因は多様であり、これまでの対策に加え、さらに多角的な見地から対策を検討する必要がある。

東京消防庁の管内で2001年～2010年に発生した電気火災のうち、電灯・電話等の配線が発生源となった火災は、電気機器や配線器具が発生源となったものと並んで上位を占めていた<sup>1)</sup>。その多くは、過電流による過剰な負荷、絶縁体の経年劣化、接続箇所の施工不良等によるケーブルの異常な発熱（過熱異常）によるものであると考えられる。

こうした過熱による火災への対策として、材料の難燃化が進められてきた<sup>2)</sup>ほか、温度センサを利用した検知などが行われている。しかし、温度センサは検知できる範囲が部分的であるため、接続箇所等、過熱異常が特に発生する可能性が高いと思われる箇所での使用に限られている。また、変電設備の小型化により、センサを設置できる箇所が制限されるという問題点もある。そのため、ケーブルの過熱異常を網羅的に監視する方法が必要

とされている。その1つの方法として、においの利用が考えられる。人間が火災を発見する情報源は、視覚による炎や煙の発見によるものが最も多く、次いで嗅覚による焦げたにおいの感知、聴覚による燃える音の感知と言われている<sup>3)</sup>。そのうち、においは明らかな異変として認識することはできるが、においから得られる情報だけでは、異変が明らかに火災によるものであると判断することや、火災が発生した場所を特定することが難しい。しかし、火災に至る以前の段階で異臭を感じたことがあるという経験のほか、実際に鉄道変電所の火災において、最初にビニールの焼けるようなにおいを感じて火災を発見した事例<sup>4)</sup>などがある。このように、においによって炎や煙などの外見上の異変を発見するより早い段階で異常を感知することができる場合があり、火災の兆候を早期に把握する手段として利用できる可能性があると考えられる。

においの発生は、ケーブルの被覆材（シース）や絶縁体等から何らかの揮発性物質が放出されていることを示している。従って、これらの揮発性物質の存在を感知することにより、過熱異常を検知することが可能であると考えられる。本稿では、揮発性物質を利用した過熱異常の検知について基礎的検討を行うため、ケーブルのシースや絶縁体等を加熱したときに放出される揮発性物質の種類と、加熱温度と放出との関係について調べた結果について報告する。

\* 人間科学研究部 生物工学研究室

\*\* 電力技術研究部 き電研究室

## 2. 過熱異常とにおいの関係

過熱異常による電気火災では、ケーブル等の導体に生じた異常な発熱がシースや絶縁体等に伝わり、変質や炭化を引き起こす。図1は、絶縁体の温度上昇とにおいの発生との関係を調べるため、プリント基板を炭化に至るまで徐々に加熱したときの外観の変化を示したものである。このとき、プリント基板の表面温度が200℃を超えると、表面に膨張などの変化が現れ始め、やがて発煙を伴って炭化した。しかし、においは外見上の変化が見られない150℃程度でも感じられた。これは、炭化より早い段階でにおいが発生していることを示している。従って、150℃程度に至った時点で発生したにおいを検知することができれば、焼損等の重大な被害への拡大を防ぐことができる可能性がある。ただし、電気設備では、正常負荷状態でも発熱があり、電力ケーブル(CVケーブル)の場合、導体許容温度は一般に90℃である。そのため、においを過熱異常の検知に利用するためには、100℃以下では発生しないにおいであることも必要である。

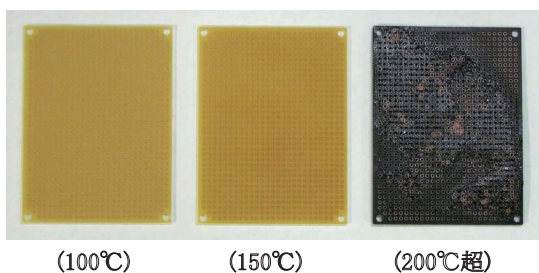


図1 プリント基板の炭化実験

## 3. 加熱試験

### 3.1 試験片

試験は、表1に示すCVケーブル、CVケーブル端末、プリント基板を用いて行った。試験片として、CVケーブルとCVケーブル端末を、それぞれ1cm×1cmにカットしたものを50枚使用した。なお、CVケーブルは、図2に示すとおり、導体の周囲を架橋ポリエチレン製の絶縁体が覆い、さらにその外側をポリ塩化ビニル(PVC)製のシースで覆った構造となっている。このため、ケーブルを解体して絶縁体とシースに分離し、それぞれから試験片を作成した。プリント基板は市販品をそのまま使用した。

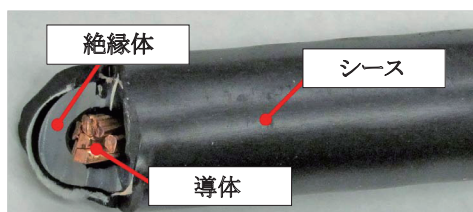


図2 CVケーブルの構造

表1 試験片一覧

No.	試験片の概要	試験片の仕様
1	CVケーブル端末 (シリコン製)	1 cm × 1 cm, 50枚
2	ビニルシース (CVケーブル, DC1500V)	1 cm × 1 cm, 50枚
3	ビニルシース (CVケーブル, AC6600V)	1 cm × 1 cm, 50枚
4	架橋ポリエチレン絶縁体 (CVケーブル, AC6600V)	1 cm × 1 cm, 50枚
5	プリント基板 (エポキシ)	9.5 cm × 7 cm, 1枚
6	プリント基板 (ガラスコンポジット)	9.5 cm × 7 cm, 1枚

### 3.2 試験方法

試験は、図3に示す試験装置で行った。チャンバーは、小形チャンバー法(JIS A 901)<sup>5)</sup>に倣い、容量20ℓのステンレス製円筒型容器とした。まず、チャンバー内に設置したホットプレート上にアルミホイルを敷き、その上に試験片を設置した。次に、チャンバーにふたをして上面の開口部からステンレス製の通気管を挿入し、エアポンプを用いて活性炭を通した無臭空気を吹き込み、チャンバー内の空気を置換した。その後、通気を止め、ホットプレートを所定の温度(50, 100, 125, 150℃)に設定して試験片を加熱し、試験片から放出する揮発性物質をチャンバー内に充満させた。

揮発性物質の採取は、固相マイクロ抽出法(Solid phase micro extraction:SPME法)で行った。この方法は、採取器具(SPMEファイバー)を空気中に露出することにより、揮発性物質をファイバーの表面に吸着させて採取するものであり、どのような揮発性物質が放出されているかを簡便に調べることができる<sup>6)</sup>。SPMEファイバー(シグマアルドリッチ製:PDMS/DVB)をチャンバー上面から導入し、吸着部をチャンバー内に1分間露出することにより、チャンバー内の揮発性物質を採取した。採取後、SPMEファイバーに吸着した揮発性物質を、ガスクロマトグラフィー質量分析法(Gas chromatography-mass spectrometry:GC/MS法)により分析した。

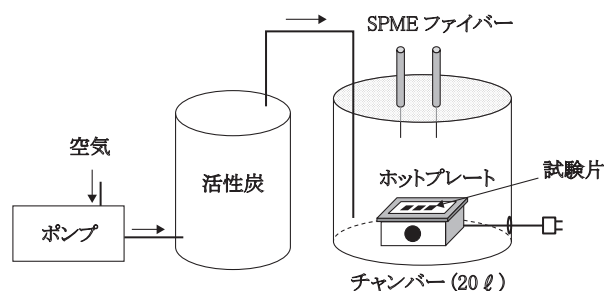


図3 チャンバー試験装置概要

3.3 試験結果

3.3.1 150℃加熱時の揮発性物質の定性分析

試験片を150℃に加熱し、放出される揮発性物質の定性分析を行った。試験結果（ガスクロマトグラム）を図4に示す。図の横軸は保持時間をあらわす。GC/MS分析において、保持時間は物質ごとに固有であり、同じ物質であれば同じ保持時間にピークとして出現する。また、保持時間と分子量情報から物質の種類を推定することができる。縦軸（アバundance）はピーク強度をあらわし、濃度が高くなるとピークが大きくなる傾向がある。ピーク強度から濃度を算出することはできないが、ピークを積分したピーク面積を比較することにより、物質ごとの濃度の変化を相対的に比較することができる。

試験の結果、架橋ポリエチレン絶縁体を除く各試験片において、1～2種類の特徴的なピークが出現した。また、試験片ごとに出現したピークの保持時間が異なった。この結果から、150℃に加熱した試験片から放出される揮発性物質は、特定の物質に限られ、かつ試験片の種類によって放出される揮発性物質の種類が異なっていることがわかった。

なお、加熱後の試験片を観察したところ、ビニルシースのNo.3試験片では、図5に示すとおり若干溶けたような形跡が見られたが、他の試験片では加熱前後で変化は見られなかった。

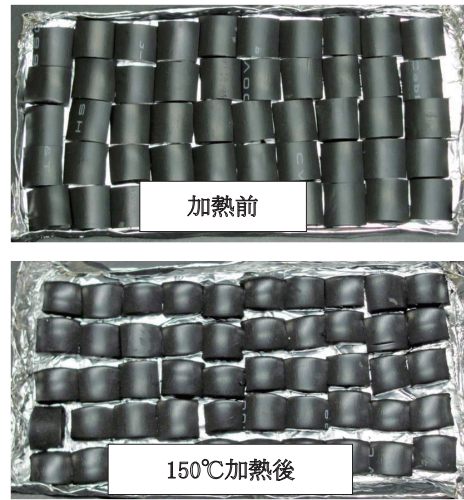
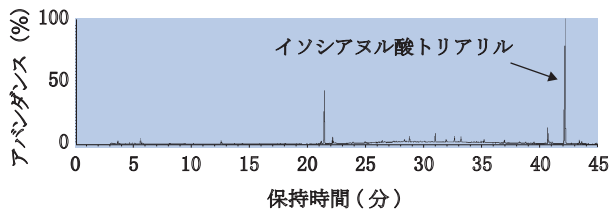


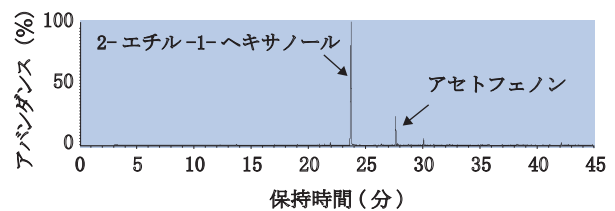
図5 150℃加熱前後の試験片の状況 (No.3 試験片)

3.3.2 揮発性物質の種類推定

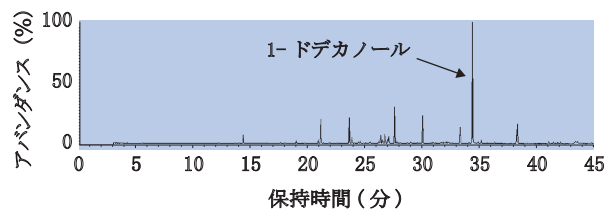
次に、各試験片から検出された揮発性物質の種類を、質量分析の結果から推定した。CV ケーブル端末から検出された特徴的なピークは、可塑剤や架橋助剤として基材に混合されるイソシアヌル酸トリアリルであった。ビニルシースから検出された特徴的なピークは、2種類の試験片で検出された物質が異なった。No.2試験片から



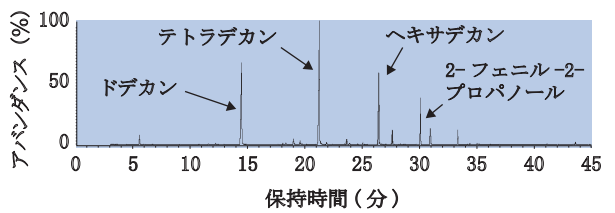
(a) CVケーブル端末 (No.1試験片)



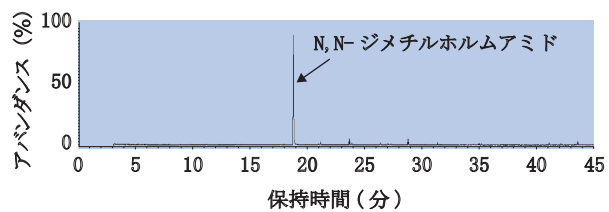
(b) ビニルシース (No.2試験片)



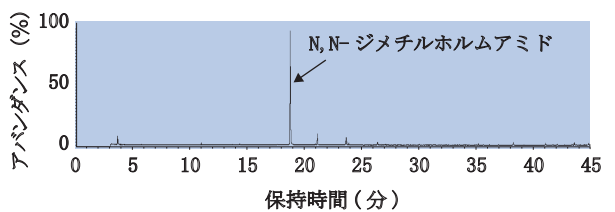
(c) ビニルシース (No.3試験片)



(d) 架橋ポリエチレン絶縁体 (No.4試験片)



(e) プリント基板 (No.5試験片)



(f) プリント基板 (No.6試験片)

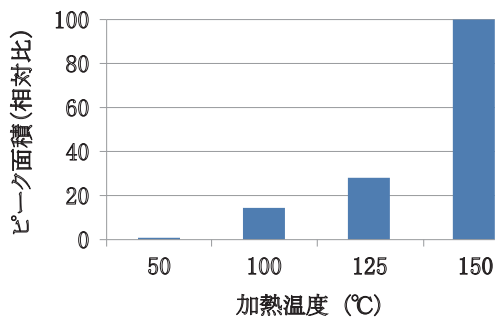
図4 150℃加熱時の試験結果（ガスクロマトグラム）

特集：人間科学

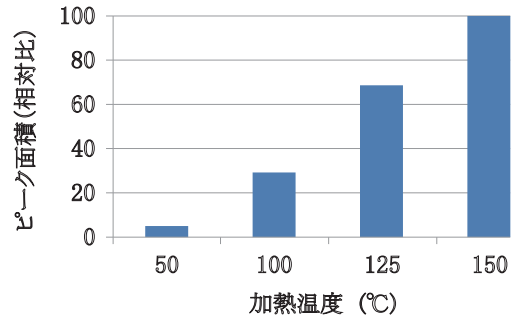
検出された物質は、可塑剤として基材に混合される2-エチル-1-ヘキサノールと、基材を製造する時の副生成物と思われるアセトフェノンであった。No.3試験片から検出された物質は、可塑剤として基材に混合される1-ドデカノールであった。プリント基板から検出された特徴的なピークは、溶剤として広く利用され、エポキシ樹脂の製造においても使用されているN,N-ジメチルホルムアミドであり、2種類の試験片（No.5, 6）の両方で検出された。なお、架橋ポリエチレン絶縁体（No.4試験片）からは、特徴的なピークは検出されなかったが、ドデカンやテトラデカン等の鎖式飽和炭化水素（アルカン）が放出されていることを確認した。

以上の結果から、150℃に加熱することで特徴的に放出される揮発性物質は、基材自体の熱分解により発生したガス成分ではなく、基材に混合されている可塑剤等の成分である可能性が高いことがわかった。また、CVケーブルからの揮発性物質の放出は、ケーブルシースが放出源であることがわかった。

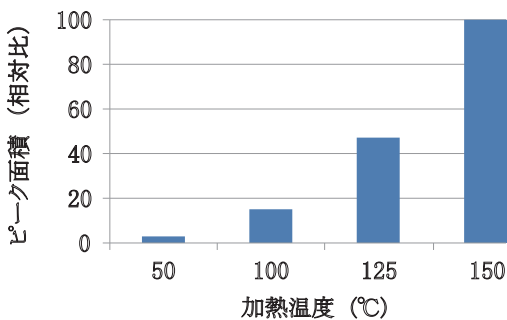
以上の結果から、150℃に加熱することで特徴的に放出される揮発性物質は、基材自体の熱分解により発生したガス成分ではなく、基材に混合されている可塑剤等の成分である可能性が高いことがわかった。また、CVケーブルからの揮発性物質の放出は、ケーブルシースが放出源であることがわかった。



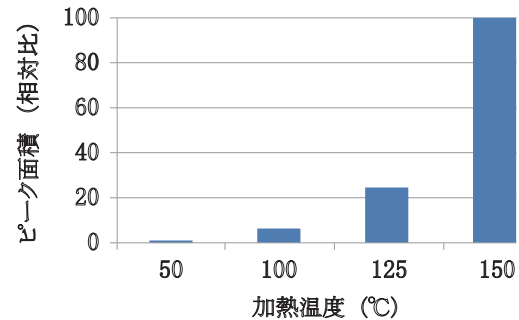
(a) イソシアヌル酸トリアリル (CVケーブル端末 No.1試験片)



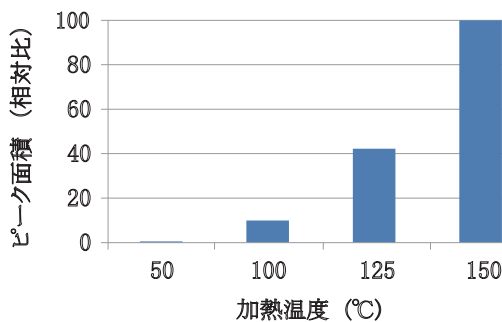
(b) 2-エチル-1-ヘキサノール (ケーブルシース No.2試験片)



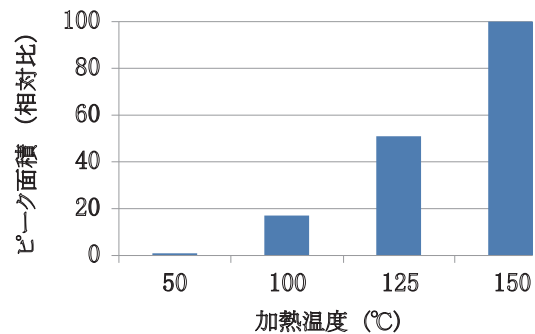
(c) アセトフェノン (ケーブルシース No.2試験片)



(d) 1-ドデカノール (ケーブルシース No.3試験片)



(e) N, N-ジメチルホルムアミド (プリント基板 No.5試験片)



(f) N, N-ジメチルホルムアミド (プリント基板 No.6試験片)

図6 各試験片から検出された特徴的な物質の加熱温度に対するピーク面積の比較

### 3.3.3 特徴的な揮発性物質の放出と温度の関係

前項で述べた特徴的な揮発性物質について、加熱する温度と放出の関係を探るため、各試験片を 50, 100, 125℃に加熱した時のピーク面積と、150℃に加熱した時のピーク面積を比較した。図 6 に 50～125℃に加熱した時の各物質のピーク面積を、150℃に加熱した時のピーク面積を 100 とした相対値で示す。100℃と 150℃におけるピーク面積を比較すると、CV ケーブル端末から検出されたイソシアヌ酸トリアリルとビニルシース (No.2 試験片) から検出されたアセトフェノンでは約 7 倍、ビニルシース (No.3 試験片) から検出された 1-ドデカノールでは約 16 倍、プリント基板から検出された N,N-ジメチルホルムアミドでは No.5 試験片で約 10 倍の差が見られた。これらの結果から、各試験片とも、揮発性物質の放出量は、50℃では僅かに確認できる程度であったが、100℃を超えると急激に大きくなる傾向を持つことがわかる。

### 3.4 まとめ

試験片を 100～150℃で加熱したときに放出される特徴的な揮発性物質は、基材の熱分解による生成物ではなく、基材に混合されている可塑剤等である可能性が高い。これらの物質が試験片を 100℃以上に加熱した場合に放出される理由は、基材である軟質ビニル等が熱によって柔らかくなり始める温度 (軟化温度) が 120℃であることから<sup>7)</sup>、基材が加熱により軟化し、混合されている可塑剤等の成分が揮発しやすくなったためであると考えられる。可塑剤は、基材に混合することにより柔軟性などの物理的性質や耐久性を持たせる重要な成分である。そのため、基材中に豊富に含まれ<sup>8)</sup>、かつ経年による減少も 11 年で 2% 程度<sup>9)</sup> と少ないことから、過熱異常の検知対象として安定して利用できると考えられる。また、ケーブルシースや絶縁体等の種類によって放出される揮発性物質が異なっていたことから、特定の揮発性物質を特異的に検出することができれば、過熱異常を起こしている部位を特定できる可能性がある。

ただし、揮発性物質を過熱異常の検知に利用する場合、誤報の可能性について検討しておくことが必要である。空気中には、電力ケーブル等から放出されるもの以外に、多くの揮発性物質が存在する。従って、過熱異常の検知に利用する揮発性物質には、通常的一般環境中からは検出されないものや、他の要因により放出される可能性が低いものを選択する必要がある。例えば、今回の試験で検出された物質のうち、イソシアヌ酸トリアリルや 1-ドデカノールは比較的用途が限られており、一般環境中からはほとんど検出されることがないため、適当であると考えられる。一方、2-エチル-1-ヘキサノール、N,N-ジメチルホルムアミドは、比較的用途が広い、もしくは

発生源が多様であるため、検知に利用する対象としては好ましくない。また、過熱異常の監視を行う箇所において、定常状態ではどのような揮発性物質が存在し、検知に利用する対象物質がどの程度存在しているかなど、定常時の空気中の揮発性物質の特徴をあらかじめ把握しておくことも重要である。

## 4. ガスセンサによる常時監視の検討

実際の変電設備において、揮発性物質を過熱異常の検知に利用するためには、揮発性物質の検出情報を電気信号に変換し、既存の監視装置で他の検知方法とあわせて常時監視を行うことが必要である。

揮発性物質の検出結果を電気信号に変換する方法では、一般的に半導体式ガスセンサが利用されており、汎用性が高いほか、リアルタイムでの計測が可能であるため、異常の発生を即時に検知することができる。そこで、汎用のガスセンサを用い、CV ケーブルから過熱異常時に放出される揮発性物質を検出することが可能であるかを調べた。

試験は、図 7 に示す試験装置で行った。耐熱強化ガラス製の監視窓を設けた FRP 製の模擬配電盤内に、CV ケーブル (AC6600V: 表 1 試験片 No.3, 4 に使用したもの) を設置し、定格の約 3 倍にあたる 450A の電流を通电してケーブルを発熱させた。この時、模擬配電盤の天井に設けた直径 10mm の開口部に取り付けたガスセンサで、ケーブルから放出された揮発性物質の検出を試みた。ガスセンサは、表 2 に示す 3 種類を用いた。

その結果、センサ A とセンサ B の 2 種類のガスセンサにおいて、図 8, 9 に示すとおり、ケーブルの表面温度の上昇とともに指示値が上昇した。さらに、ケーブルの表面温度が 100℃を超えると温度変化に対する指示値の上昇が大きくなり、図 6 と同様の傾向が得られた。一方、センサ C は本試験では応答しなかった。このセンサは、作業環境や工場排ガスの管理に用いられる検知範囲が比較的高濃度のセンサであり、ケーブルから放出された揮発性物質の濃度が、このセンサの検出範囲の下限に近かったためであると考えられる。

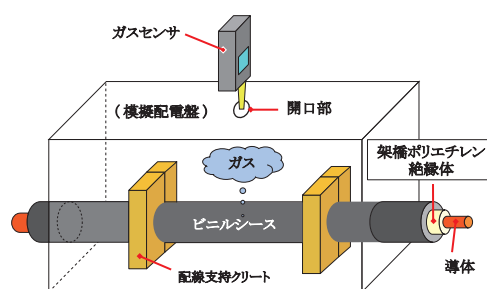


図 7 模擬配電盤試験装置概要

表2 試験に用いたガスセンサ

センサ	検出原理	検出範囲 (mg/m <sup>3</sup> , トルエン換算値)
A	半導体式	0 ~ 10 <sup>2</sup>
B		10 <sup>-3</sup> ~ 10
C		1 ~ 10 <sup>4</sup>

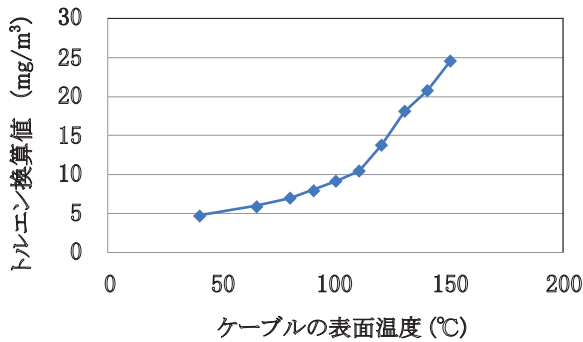


図8 ケーブル表面温度と指示値の関係 (センサ A)

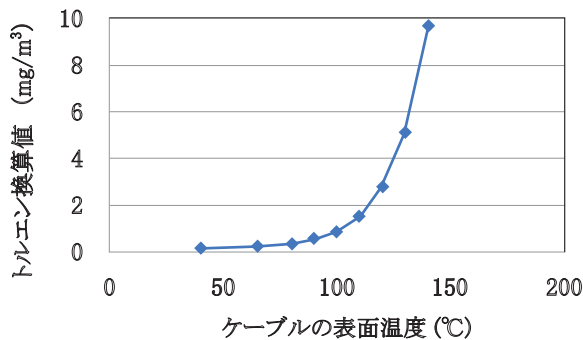


図9 ケーブル表面温度と指示値の関係 (センサ B)

以上の結果から、検出範囲が比較的低濃度のガスセンサを用いることにより、過熱異常時にケーブル表面から放出される揮発性物質を検出可能であることがわかった。

## 5. おわりに

過熱異常時にケーブルシースや絶縁体等から放出される物質は、基材に混合されている可塑剤等の揮発性物質である可能性が高く、火災に至る温度より低い100～150℃で急激に放出されていることがわかった。また、過熱異常時に放出された揮発性物質は、検出範囲が比較的低濃度のガスセンサで検出できることを確認した。しかし、実際の変電所では、床材や塗料など、日常的に多様な揮発性物質が放出されており、立地によっては近隣の工場など外部から揮発性物質が流入することも考えられる。信頼性の高い過熱異常の検知方法を確立するためには、こうした環境の中で、明らかに過熱異常によるものを選択的に検出することが課題である。

## 文献

- 1) 東京消防庁予防部調査課：電気火災の実態と最近の傾向，火災，Vol.62，No.2，pp.2-6，2012
- 2) 井上博信：高圧電力ケーブル端末の難燃化，鉄道と電気技術，Vol.8，No.12，pp.21-24，1997
- 3) 能美隆：火災とニオイ，火災，Vol.58，No.5，pp.19-24，2008
- 4) 東京消防庁調査課：鉄道変電所から出火しライフラインに影響を及ぼした火災，火災，Vol.59，No.6，pp.60-63，2009
- 5) JIS A 1901, 建築材料の揮発性有機化合物 (VOC), ホルムアルデヒド及び他のカルボニル化合物放散測定方法—小形チャンバー法, 2009
- 6) 京谷隆, 川崎たまみ, 潮木知良, 早川敏雄: 駅構内等においてに関する揮発性物質分析手法, 鉄道総研報告, Vol.23, No.7, pp.29-32, 2009
- 7) 大和和夫編: 電線・ケーブルハンドブック, 山海堂, 1976
- 8) 調子康雄: 可塑剤の適材適所, 油化学, Vol.33, No.7, pp.411-419, 1984
- 9) 重枝秀紀, 赤木雅陽, 森本大観: 直流き電ケーブルの地絡検出手法, 鉄道総研報告, Vol.25, No.4, pp.5-10, 2011