Detection of Smoldering Fire Using Tin Oxide Gas Sensors

Tsubasa Higashino Student Member (Kanazawa Seiryō University)

Ayako Sawada Member (Kanazawa Seiryō University)

Takashi Oyabu Member (Kanazawa Seiryō University)

Yoshinori Takei Member (Kanazawa Institute of Technology)

Hidehito Nanto Member (Kanazawa Institute of Technology)

Kiyoshi Toko Member (Kyushu University)

Keywords : gas sensor, smoldering fire, principle component analysis, differential characteristic, sensory system

Detecting technique of smoldering fire was examined using tin oxide gas sensors. Eight sensors were installed in a room. They were same type. Four kinds of materials were adopted as a fire-source material. The materials were cotton cloth, wallpaper, curtain cloth and woodchip, which were main smoldering fire-source materials in an indoor environment. The sensor outputs to gases evolved upon the smoldering fire of the materials were measured. The differential characteristic of the output was derived to analyze. As for the results, it became obvious that the sensor locating at higher position had a higher sensitivity and it could sense the fire instantaneously. It is thought that the generated gases rise up directly toward the ceiling and reflect downward. A small type of electric cooking stove was used as a fire-source. The surface temperature of the stove plate arrived at 340 °C. A bar was adopted to set the sensors freely. In this experiment, three bars were adopted and the heights of the sensor position were 50, 100, 150 and 200 cm from the floor. It is effective to locate the sensor at higher position in detecting a smoldering fire. The sensor characteristics were analyzed using principal component analysis (PCA). The system could discriminate source materials among wallpaper, woodchip and curtain for smoldering fire by utilizing the result of PCA. But, the smoldering fire of cotton cloth could not be distinguished from that of curtain by this system. Each fire could be identified in four minutes.

Typical sensor characteristics for smoldering fire of cotton cloth are shown in Fig. 1. The ch 5 sensor has a higher output. The sensor is located at the highest position of center bar. The outputs

were measured every 0.1 ms and they were summed for two seconds. It is called as integrated value. The differential characteristics for the integrated values are shown in Fig. 2. The characteristics ch 4 and 5 change largely. These sensors are near the fire-source. The threshold value (V_{th}) was introduced for the characteristics and the time in which the characteristics exceeded the V_{th} was derived. PCA was applied to the time. The result is indicated in Fig. 3. It is effective to discriminate three materials as a fire material. It is also effective to be located the sensor at higher position.

Fig. 2. Differential characteristics of integrated value for smoldering fire of cotton cloth

Fig. 1. Sensor characteristics for smoldering fire of cotton cloth

Fig. 3. Principal component analysis results of ch 3, 4 and 5 sensors for four types of smoldering fire

ガスセンサによる燻焼火災検知

学生員 東野 翼* 正 員 沢田 史子*
 正 員 大藪多可志* 正 員 竹井 義法**
 正 員 南戸 秀仁** 正 員 都甲 潔***

Detection of Smoldering Fire Using Tin Oxide Gas Sensors

Tsubasa Higashino*, Student Member, Ayako Sawada*, Member, Takashi Oyabu*, Member
 Yoshinori Takei**, Member, Hidehito Nanto**, Member, Kiyoshi Toko***, Member

Detecting technique of smoldering fire was examined using tin oxide gas sensors. Eight sensors were installed in a room. They were same type. Four kinds of materials were adopted as a fire-source material. The materials were cotton cloth, wallpaper, curtain cloth and woodchip, which were main smoldering fire-source materials in an indoor environment. The sensor outputs to gases evolved upon the smoldering fire of the materials were measured. The differential characteristic of the output was derived to analyze. As for the results, it became obvious that the sensor locating at higher position had a higher sensitivity and it could sense the fire instantaneously. It is thought that the generated gases rise up directly toward the ceiling and reflect downward. A small type of electric cooking stove was used as a fire-source. The surface temperature of the stove plate arrived at 340 °C. A bar was adopted to set the sensors freely. In this experiment, three bars were adopted and the heights of the sensor position were 50, 100, 150 and 200 cm from the floor. It is effective to locate the sensor at higher position in detecting a smoldering fire. The sensor characteristics were analyzed using principal component analysis (PCA). The system could discriminate source materials among wallpaper, woodchip and curtain for smoldering fire by utilizing the result of PCA. But, the smoldering fire of cotton cloth could not be distinguished from that of curtain by this system. Each fire could be identified in four minutes.

キーワード：ガスセンサ，燻焼火災，主成分分析，差分特性，センサシステム

Keywords : gas sensor, smoldering fire, principal component analysis, differential characteristic, sensory system

1. はじめに

日本における火災件数は年々増加傾向にある。2004 年度における住宅火災死者数は 1038 人(放火自殺者を除く)に達し、その内 590 人(約 60%)が 65 歳以上の高齢者である⁽¹⁾。高齢者は感覚の衰えから火災発生に気づくのが遅く大惨事になるケースが多い。平成 18 年 6 月より新築住宅の寝室などに火災警報器の設置が義務付けられた。既存住宅においても各市町村が定めた期日まで設置することが条例で定め

られつつある。火災警報器を用いると比較的初期段階で覚知できスピーディな消火が可能となる。火災警報器を用いることにより死者発生割合は 3 分の 1 にとどまっている。このため、高感度センサ等を用いて、さらに火災を早期に検知し発生位置、火災源種の同定可能なシステム構築が必要である。

6 種類 (建物、林野、車両、船舶、航空機、その他) の火災の中で 55.2%が建物火災であり、その死者数の 8 割以上が住宅火災 (一般、共同、併用住宅) で占められている。本研究では、ガスセンサを用いて一般住宅における燻焼火災を想定し早期検知システム構築を試みた。実験では 8 個の同型酸化スズ系ガスセンサの応答特性を用いた。それらの特性から火災源の位置と種類、煙、ニオイの伝播スピードについて同定を試みた。火災源種として、木くず (woodchip)、壁紙 (wallpaper)、カーテン布 (curtain)、綿布 (cotton)などを採用した。これらは、室内環境で火災源となる可能性の高いものである。結果として、高さの異なる位置のセンサ応答特性に主成分分析法を適用することにより、火災源種を

* 金沢星稜大学
 〒920-8620 石川県金沢市御所町丑 10 番地 1
 Kanazawa Seiryō University
 10-1 Ushi, gosho, kanazawa-shi, ishikawa 920-8620

** 金沢工業大学・工学研究科
 〒924-0838 石川県白山市八束穂 3 丁目 1 番地
 Kanazawa Institute of Technology
 3-1 Yatsukaho, Hakusan, Ishikawa 924-0838

*** 九州大学・システム情報化学研究院
 〒819-0395 福岡市西区元岡 744
 Kyushu University
 744 Moto-oka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395

木くずと壁紙，カーテン布・綿布という 3 つのグループに判別可能であった。ガスセンサ特性を用いることにより火災源のみならず発生時刻，位置を求めることも可能である。当該センサを用いることにより，火災早期検知システムの構築が可能であるとの知見を得た。

2. 実験方法

室内にセンサを取り付けるための 3 本の支柱を 70cm 間隔で配置し実験を行った。中央の支柱には，床より 50cm，100cm，150cm，200cm の位置にセンサを取り付けた。左右の支柱には 100cm，150cm の高さにセンサを取り付け，合計 8 個の酸化スズ系ガスセンサ (Figaro, TGS# 800) を取り付けた。これらのセンサを ch 0 - 7 と称する。センサからの応答は 0.1 秒間隔でコンピュータに取り込む。支柱に取り付けたセンサ番号を以下に示す。

- Left bar : ch 0 (100 cm), ch 1 (150 cm)
- Center bar : ch 2 (50 cm), ch 3 (100cm), ch 4 (150cm), ch 5 (200 cm)
- Right bar : ch 6 (100cm), ch 7 (150 cm)

実験室内の容積は 47.53 m³ である。その概要を Fig. 1 に示す。(a)図はセンサや火災源のレイアウト，(b)図は実験装置の構成である。実験では住宅内の燐焼火災を想定し，発火源と考えられる物質をステンレス皿の上に置き，電気コンロを使用し燐焼状態を導出した。ホテルや住宅で発生する火災の多くがタバコ等による燐焼火災である。発火源に使用した物質は木くず，カーテン布，綿布，壁紙である。各試料の重さは 1g とした，通電時間は 10 分間である。火災源種は中央の支柱から 50cm 離れた位置に配置した。実験は各試料 3 回ずつ行った。各センサの出力 V_s を計測し煙やノイオの伝播特性を調べ火災源種の同定について検討した。

3. 実験結果

〈3・1〉 電気コンロの温度上昇特性 電気コンロに通電したときのステンレス皿表面の温度上昇特性を Fig. 2 に示す。通電後 10 分間で 340℃に到達する。この温度は，雰囲気温度や風量の有無により数℃の差が生じる。このときの風量と室内温度変化のグラフを Fig. 3 に示す。(a)図は，室内の風量変化特性である。最大で 0.07 m/sec の風量が認められたが，平均で 0.015 m/sec であった。このわずかな風量でもセンサ特性に影響を与える。(b)図は，室内の温度変化特性である。電気コンロの通電開始から約 2 分で室温が上昇し，10 分間の通電後電気コンロを OFF にしても 5 分間上昇し続ける。すなわち，通電開始から 15 分後に最大温度 29℃に到達した。電気コンロを 10 分間作動させることにより約 1℃の室温上昇が認められた。

〈3・2〉 燐焼火災によるセンサ特性 一般住宅の火災要因として，衣類などが石油ストーブや電気ストーブに接触し火災がおこるケースが考えられる。これを想定し，ステンレス皿の上に綿布を置き燐焼実験を行った。その時の出力結果を Fig. 4 に示す。Center bar の最も高い位置にある

(a) 実験室のレイアウト
(a) Layout of experimental room.

(b) 実験装置の構成
(b) Experimental system and gas sensor.

図 1 実験室内のレイアウトと実験装置の構成
Fig. 1. Layout of experimental room and system.

図 2 電気コンロ通電時のステンレス皿表面の温度変化
Fig. 2. Surface temperature of electric stove-plate.

センサ(ch5)の応答が高い。これは，燐焼火災により発生したガス成分が，まず天井に到達し反射していると考えられる。Fig. 4 の特性のノイズ成分を除去するためにセンサ出力の 2 秒間毎の総和 (積分値) を求めた。その特性(V_{ts})を Fig. 5 に示す。Fig. 4 の特徴を損なうことなくスムージングされて

(a) 室内の風量変化
(a) Wind velocity characteristic.

(b) 室内の温度変化
(b) Temperature characteristic.

図3 電気コンロ通電時の室内風量変化と温度変化
Fig. 3. Wind velocity and temperature characteristics in the experimental room under electric stove ON.

図4 綿布燐焼時のセンサ特性

Fig. 4. Sensor characteristics for smoldering fire of cotton cloth.

いる。さらに、Fig. 4 の特徴が増幅されて表れている。Center bar の ch 5 のセンサ特性が顕著である。Fig. 5 の特徴を明確に示すために、Fig. 5 の差分特性を求めた。それを Fig. 6 に

図5 綿布燐焼時のセンサ出力の2秒間積分値特性
Fig. 5. Integrated value characteristics of sensor output for two seconds.

図6 綿布燐焼時の積分値の差分特性
Fig. 6. Differential characteristics of integrated value for smoldering fire of cotton cloth.

示す。このとき差分特性が大きく変化しているのは Center bar に設置された ch 4, 5 である。電気コンロが ON になるとともに ch 4 と 5 の特性が変動し 3 分後に大きく変動していることがわかる。すなわち、火災源に近い支柱のセンサが早く反応していることがわかる。

Fig. 6 の特性に閾値 V_{th} (0.2 [V/sec]) を設け、その値を超えた最初の時刻を計測した。それを Fig. 7 に示す。図は 3 回実験を行った結果の平均値をプロットしてある。電気コンロのスイッチを入れてから 4 分程度で ch 5, 4 のセンサが応答し、続いて ch 3, 2 と低い位置のセンサに向かって順次検知していくことがわかる、縦軸は閾値(V_{th})を超えたときの時刻である。ch 5 のセンサは 3 分 30 秒程度で閾値(V_{th})を超えたことになる。ch 4 も比較的早く超えているが ch 3 と 2 は 8 分以上かかっている。Left bar と Right bar のセンサも 7 分以上かかっている。高い位置にあるセンサ程早く応答している。

他の 3 物質についても同様の解析を行った。Fig. 8 に木くず、Fig. 9 に壁紙、Fig. 10 にカーテン布の結果を示す。いず

図 7 綿布燻焼時の差分特性における閾値を超えた平均時間

Fig. 7. Average time at which V_{is} exceed the threshold value for smoldering fire of cotton.

図 10 カーテン燻焼時の差分特性における閾値を超えた平均時間

Fig. 10. Average time at which V_{is} exceed the threshold value for smoldering fire of curtain.

図 8 木くず燻焼時の差分特性における閾値を超えた平均時間

Fig. 8. Average time at which V_{is} exceed the threshold value for smoldering fire of woodchip.

図 11 実験に使用した 4 つの試料に対して ch 5 が閾値を超えた時間

Fig. 11. Time in which V_{is} of ch 5 sensor exceeded the V_{th} for the four materials.

図 9 壁紙燻焼時の差分特性における閾値を超えた平均時間

Fig. 9. Average time at which V_{is} exceed the threshold value for smoldering fire of wallpaper.

れの試料も一番高い位置のセンサから応答し、4 分以内に検知していることがわかる。以上の事柄により、ガスセンサを用いて燻焼火災を検知する場合は高い位置にセンサを配置する必要があるといえる。実験に使用した 4 つの試料の中で最も早く覚知できたのは壁紙であった。続いて木くず、カーテン布、綿布となっている。カーテン布と綿布の覚知に 3 分以上要する。各試料の実験で Center bar に取り付けてある ch 5 (200cm)が閾値(V_{th})を超えたときの時間を Fig. 11 に示す。壁紙は最も早く検知される。壁紙や木くずは燻焼火災になるとガス状物質が出やすいといえる。壁紙の多くは原料に合成樹脂が使われており、木くずが燃えるとセルロース等が多量に発生する。

〈3・3〉 センサ出力特性の主成分分析結果 実験は各試料に対して 3 回ずつ行った。各実験において閾値を超えた時間を求めた。その結果に対して主成分分析を行い燻焼

図 12 3 センサを用いた主成分分析結果

Fig. 12. Principal component analysis results of ch 3, 4 and 5 sensors for four types of smoldering fire.

試料の同定を試みた。その結果を Fig. 12 に示す。図では発火源から一番近い Center bar に取り付けられた ch 3, 4, 5 のセンサを用いて主成分分析を行った。図は横軸に第 1 主成分、縦軸に第 2 主成分が示されている。各主成分を表す式を以下に示す。 x_1, x_2, x_3 は ch 3, 4, 5 のセンサが V_{th} を超えた時間である。第 1 主成分(z_1)が 80.5 % の情報量を有していることになる。

$$\begin{aligned} z_1 &= 0.91 x_1 + 0.30 x_2 + 0.27 x_3 \\ z_2 &= 0.41 x_1 - 0.61 x_2 - 0.67 x_3 \\ z_3 &= -0.04 x_1 + 0.72 x_2 - 0.68 x_3 \end{aligned} \quad (1)$$

各試料に対して 3 つのプロットが示されており各々クラスターを形成している。特に、木くずと壁紙の判別は容易である。すなわち、第 1 主成分ではニオイの強さを示していると考えられる。数値が小さくなる程、ニオイが強い。また、第 2 主成分はガス成分の上部に向かって拡散する速さを示していると考えられる。数値が大きい程拡散するスピードが早い。すなわち、壁紙に使用されている合成樹脂が速く燻焼することにより発生するガス成分は高い位置に向かって上昇する、ch 5 のセンサは早く応答するが ch 3, 4 のセンサの応答は木くずよりも遅くなる。この結果より、火災源種の同定を行うには高さ方向に 3 つのセンサ特性を用いる必要がある。

4. ま と め

消防法の改正により、一般新築住宅への火災報知機の設置が義務付けられた。また、既存住宅でも火災報知機の設置により保険料の割引サービス実施や市町村が定めた期日までの火災報知機の設置が義務付けられている。このため、高性能で信頼性の高い火災報知機の開発は急務である。火災報知機は光、温度、ガス、煙を検知する様々なタイプがあり室内環境に合わせた選択が必要である。さらに、様々

な火災源種に対応するものでなければならない。早期検知を行うには、複数センサからの特性を常時モニタリングし、加工を行い素早い警報と情報伝達を行えるシステムが必要である。

本研究では、酸化スズ系ガスセンサを用いた燻焼火災検知について検討を行った。実験の結果、当該センサは火災発生から 4 分以内での検知が可能である。高齢者などの逃げ遅れ対策に十分対応できるものと考えられる。また、火災源から近い複数のセンサ特性を用いて、主成分分析を行うことにより、一部の火災源種の同定も可能である。実験においては、同型複数ガスセンサを配置し、その出力特性から差分特性を求めることにより燻焼火災を認知する手法について調べた。他のセンサでは難しい 4 分以内での検知が可能となった。また、それらセンサの主成分分析を行うことにより、いくらか火災源種も同定できることが明らかとなった。今後は異なった型のガスセンサを組み合わせることで早期火災発見とその種類を同定することを試みる。

謝 辞

本研究の一部は総務省消防庁消防防災科学技術研究推進制度により行われたものである。ここに記し深く感謝申し上げる。

(平成 18 年 9 月 13 日受付, 平成 19 年 2 月 22 日再受付)

文 献

- (1) 消防庁編:「消防白書」, ぎょうせい (平成 17 年)
- (2) T. Oyabu: "A simple type of fire and gas leak prevention system using tin oxide gas sensors", SENSORS AND ACTUATORS B Chemical, Vol.5, pp.227-229 (1991)
- (3) T. Oyabu: "An algorithm for evaluating disasters by fuzzy reasoning", SENSORS AND ACTUATORS B Chemical, Vol.10, No.2, pp.143-148(1993)
- (4) 大藪多可志・木村春彦:「プロダクションシステムを用いた家庭内災害の同定」, 計測自動制御学会論文誌, Vol.30, No.9, pp.1077-1083 (1994)
- (5) 田代哲朗・竹井義法・笠原 浩・岩崎幸代・南戸秀仁:「防災用ガスセンサアレイの開発と火災探知ロボットへの応用」, 電気学会・ケミカルセンサ研究会, CHS-04-28, pp.5-10 (2004 年 12 月 3 日)
- (6) 東野 翼・沢田史子・大藪多可志・新保達也・石樽大介・竹井義法・南戸秀仁・都甲 潔:「タバコ燻焼火災に対するガスセンサ特性」, 電気学会ケミカルセンサ研究会, CHS-06-5, pp.17-21 (2006-5)
- (7) A. Sawada, T. Shimbo, T. Oyabu, Y. Takei, H. Nanto, and K. Toko: "Gas sensor characteristics for smoldering fire caused by a cigarette smoke", The 11th International Meeting on Chemical Sensors, TP46 (July 16-19, 2006, Brescia, Italy)

東 野 翼

(学生員) 1983 年 8 月 6 日生。2006 年 3 月金沢星稜大学経済学部卒業。同年、金沢星稜大学大学院地域経済システム研究科入学。現在、ガスセンサを用いた火災検知システム開発に従事。また、複数のセンサを用いた室内環境認知に興味を持つ。

沢田 史子

(正員) 2005年3月北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科博士後期課程修了。同年金沢星稜大学非常勤講師，現在に至る。ガス・ニオイセンサを用いたセンシングシステム，観光情報学などの研究に従事。博士（知識科学）。計測自動制御学会，日本設備管理学会，観光情報学会各会員。

南戸 秀仁

(正員) 1980年大阪大学大学院工学研究科原子力学専攻博士課程修了（工学博士）。金沢工業大学工学部助教授を経て，1998年同教授，現在に至る。現在，金沢工業大学高材センター所長，におい及び放射線センサシステムの研究開発に従事，1988年から1989年マサチューセッツ工科大学エレクトロニクス研究所客員研究員。

大藪 多可志

(正員) 1973年工学院大学工学研究科修士課程修了。75年早稲田大学第二文学部英文科卒業。80年金沢女子短期大学講師，助教授，教授を経て94年富山国際大学人文学部教授。98年金沢星稜大学経済学部教授。現在，植物の環境浄化能力の評価に関する研究に従事（工学博士）。電子情報通信学会，計測自動制御学会，電気化学会，日本設備管理学会各会員。

都甲 潔

(正員) 1953年生。1980年九州大学大学院博士後期課程修了。同年同大学助手。1990年同大学助教授。1997年九州大学大学院システム情報科学研究院教授。工学博士。味覚センサと匂いセンサを両輪とする感性バイオセンサの研究に従事。

竹井 義法

(正員) 1996年福岡大学工学部電気工学科卒業。2001年九州大学大学院システム情報科学研究科博士後期課程単位取得後退学。同年同大学大学院システム情報科学研究院助手。2002年金沢工業大学工学部研究員を経て，2004年同大学工学部ロボティクス学科講師，現在に至る。博士（工学）。システム同定，匂い及び味センサに関する研究に従事。計測自動制御学会会員。