

# 可燃性粉粒体貯蔵時の初期火災検知に関する検証実験†

八 島 正 明\*1

本研究では、可燃性の粉粒体を扱う貯槽に取り付ける、火災検知用のセンサに関する知見を得るための検証実験を行った。センサとしては、においセンサ、CO センサ、CO<sub>2</sub> を用いた。実験として、熱面実験、燃焼管を使った実験、タンクを使った堆積実験などを行った。実験の結果、においセンサと CO センサがくん焼を呈する初期火災検知に有効であることが確認できた、また、熱画像カメラは初期火災検知には不向きであることがわかった。可燃性粉粒体の貯蔵時に堆積層内で発火した場合には、火炎が形成せず堆積層内でくん焼することと、そのくん焼では CO<sub>2</sub> の発生が少ないため、初期火災検知に CO<sub>2</sub> センサが不向きであることがわかった。燃焼管実験によると、においが先に検知され、次に CO 濃度が増加し始め、CO 濃度が変動しながら徐々に増加する傾向が見られる。このような変化が見られる場合は、堆積物が燃焼や熱分解など何らかの熱的な事象、異変が発生したと判断できる。

**キーワード:** 火災検知、においセンサ、CO センサ、廃棄物火災、サイロ火災。

## 1. はじめに

可燃性物質を扱う貯蔵施設において、自然発火などを原因とする火災がたびたび発生している。近年では、三重県のごみ固形燃料発電所のサイロの爆発・火災(2003年)のほか、民間や公的な廃棄物リサイクル施設での爆発・火災、大豆サイロでの爆発(2013年)、石炭貯蔵施設での火災・爆発(2013年)などが発生している。また、消火と拡大防止のために作業員がかき出し作業中に小規模爆発や急に火炎が形成して被災する事例もある。

近年の同種災害を調べたところ、発熱を開始してから時間が経過してから火災や爆発が発生している場合が多く、早期に異変に気が付いて対処していれば災害に至らなかったのではないかと考えられる事例があることがわかった<sup>1)</sup>。取り扱う物質、施設、貯蔵方法などに応じたセンサを設置し、適切なモニタリングとその評価が行われていれば、被害を軽減できた可能性がある。最近、石炭サイロ用のセンサとモニタリングシステムについては研究が行われ、実用化している<sup>2,3)</sup>。木造住宅の火災に適用できるにおいセンサに関する研究も行われている<sup>4,5)</sup>。このほか近年、欧州ではバイオマス燃料の一つとして木質ペレットの利用が増加し、その貯蔵施設において長期保存による酸化等による一酸化炭素(CO)の発生の危険性が指摘され、(爆発や火災の危険性ではなく)有害性に関する対策が求められている<sup>6)</sup>。

発熱開始から火災の進展を予測し、拡大防止の措置を講じることは必要である。このとき、火災などの異常発生を検知し、事象を把握し、予測するため、温度計やガス検知器などの適切なセンサの設置が不可欠である。さらに、異常発生時には現場作業員が緊急排出や消火等の

トラブル対処作業を行うことがあるが、事象の進展を把握し、退避することを常に考えておく必要がある。

本研究では、可燃性の粉粒体を扱う貯槽に取り付ける火災検知用のセンサに関する知見を得るための検証実験を行った。センサとしては、においセンサ、CO センサ、CO<sub>2</sub> センサを用いた。

## 2. 実験の概要

### 1) 実験項目

本研究では、a)熱面実験、b)燃焼管実験、c)堆積実験を行った。

熱面実験では、貯蔵される粉体や粒体のほか、貯槽の材料となるもの的高温時に発生するガスについて、においセンサ、CO センサ、CO<sub>2</sub> センサの応答性・出力を調べた。

燃焼管実験では、堆積層内に設置したニクロム線の加熱で可燃性の試料をくん焼させ、堆積層上方・気相に設置したにおいセンサと CO センサの応答性・出力を調べた。このとき、試料の堆積高さを 50~1,000 mm の範囲で、センサの設置位置を変えて調べた。

堆積実験では、ストックヤードでの野積み状態を模擬し、実験室内の開放空間に堆積した状態、さらに貯蔵タンクに堆積した場合を模擬し、実規模に近いタンクに堆積した状態でセンサの応答性・出力を調べた。

### 2) ガス検知

#### (1) ガスセンサ

ガスセンサとしては、フィガロ技研製のにおい用 TGS2600 と TGS2602 (半導体式検知)、CO 用 TGS5042-A00 (電気化学式検知)、CO<sub>2</sub> 用 CDM7160 (非分散型赤外線)、を用いた。このほか、CO については、高感度ガス検知器(CO濃度計)、携行型の CO モニタ、4成分(酸素、可燃性ガス、CO、硫化水素)マルチ型ガスモニタ(2製品)を併用した。

においセンサは、空気清浄機の制御に使われている空気の汚れ検知用のもので、タバコの煙や調理臭などに高

† 本報の一部は、第 53 回安全工学研究発表会講演予稿集、pp. 149-152、2020、安全工学シンポジウム 2021 講演予稿集、pp.282-283 の記述の一部を加筆修正し、まとめ直したものである。

\*1 労働安全衛生総合研究所化学安全研究グループ

連絡先：〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6

労働安全衛生総合研究所 化学安全研究グループ 八島正明

E-mail: yashima@s.jniosh.johas.go.jp

い感度を持ち、水素、CO、エタノール、メタン、インブタンなどのガス濃度に対して一定のセンサ抵抗比を有する。TGS2600 は空気の汚れ全般を高感度に検知できるもので、代表的な検知対象の水素については濃度 1 ~ 30 ppm の検知範囲を有する。TGS2602 は、特に VOC、アンモニア、硫化水素を高感度に検知できるもので、代表的な検知対象のエタノールについて濃度 1 ~ 30 ppm の検知範囲を有する。

CO センサは、検知範囲は 0~10,000 ppm、常用温度 0~50℃（短時間使用~55℃）のもので、CO のほかに水素などにも感度を有し、出力においては CO に対して高い選択性を有する。CO については、高感度ガス検知器 XP-3160（新コスモス電機製、接触燃焼式、自動吸引、CO : 0~10,000 ppm、CO 濃度計）を併用した。

センサからの出力・信号変換は同センサメーカーが市販している評価回路を用い、出力波形をデータロガーに記録し、解析した。なおセンサの出力は TTL 信号として、なおいを有するガスを検知すると電圧信号が H レベルから L レベル、あるいは L レベルから H レベルに変化するものである。

センサの感度は、評価回路上で L（低感度）あるいは H（高感度）を切り替えることができる。本研究では実験中のノイズを低減するため、すべての実験において感度を L とした。

## (2) 温度測定

燃焼管やタンクの温度分布を調べるため、熱画像カメラ（InfRec G-100、日本アビオニクス製）を用いた。カメラは携行型で測定温度範囲 -40~+500℃、フレームレート 60 Hz、測定波長 8~14 μm である。

## 3) 試料

試料は可燃性の有機物とし、石松子、木粉（ベイツガ）、大豆粉、石炭粉（瀝青炭）、コークス粉などのほか、粉体ではないが PMMA 樹脂ペレットなどのプラスチック、RPF（紙・プラスチックを原料とする固形廃棄物）、木質ペレット、電線ケーブル、硬質ウレタンなどの断熱材など 26 種類を用いた。電線ケーブルや断熱材は貯蔵物ではないが、設備を構成する材料で、可燃性の物でもあり、火災の原因となりえるため用いた。

このほか、堆積実験では可燃性の物が貯蔵中に実際に蓄熱発火しないように、不燃性の物で代替した。試料として、白玉砂利（日本玉石製、寸法 8 分：20~30 mm）を用いた。

用いた試料については、予め熱分解温度を把握するため、TG-DTA 分析を行った。

## 3. 熱面実験

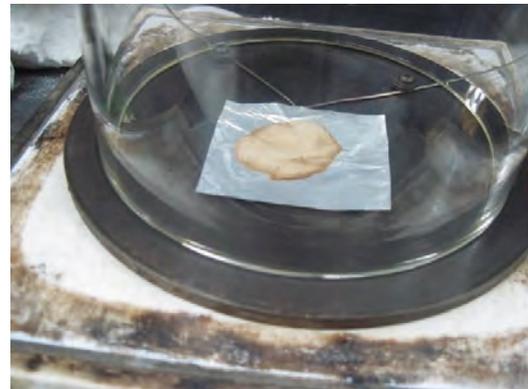
### 1) 実験装置および実験方法

#### (1) 実験装置

図 1 に熱面実験の装置の様子を示す。実験では、ホットプレート本体に保護用の円板を置き、試料と試料皿と



図 1 熱面実験装置の様子



(a)木粉（ベイツガ）



(b)木質ペレット

図 2 試料を熱面に載せた様子

したアルミ箱、パイレックス製のガラス円筒（内径 160 mm×高さ 500 mm）をその上に載せる。予備実験によると、試料を円板の上に直接載せて使用すると加熱による試料の汚れが次の回の実験に影響することが判明したため、試料はアルミ箱の上に載せるようにした（図 2）。アルミ箱については、実験の温度範囲でいなどが発生せず、測定に影響しないことを予め確認した。ガスセンサは開放場で、ガラス円筒の上端から 60 mm 上に設置した。実験装置上方にはフード付きの局所排気装置が

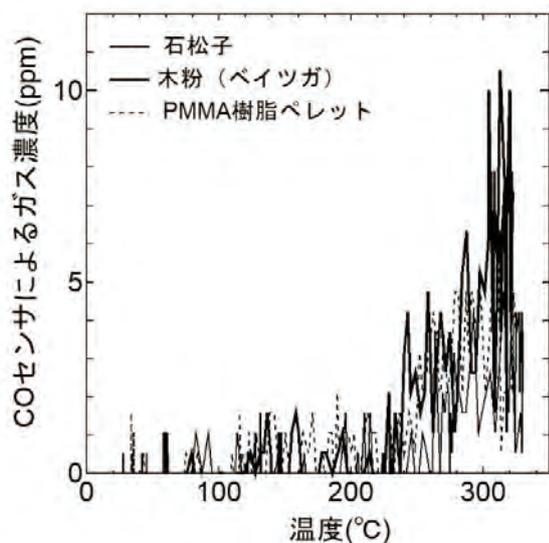


図3 ガス濃度の変化（昇温実験，昇温速度 16°C/min）

表1 昇温実験によるセンサの検知の測定結果

試料	においセンサが検知したときの熱面温度(°C)	CO センサによるガス濃度 (ppm)	TG による減量開始温度 (交点温度) (°C)
石松子	264	4	243
木粉 (ベイツガ)	240	4	246
PMMA 樹脂ペレット	255	2	287

設置してある。ガスセンサ付近の温度は、熱面温度が 320 °C のときは 41 °C 程度で、CO センサの適用温度 (55 °C) 内にあることを確認した。

## (2) 実験方法

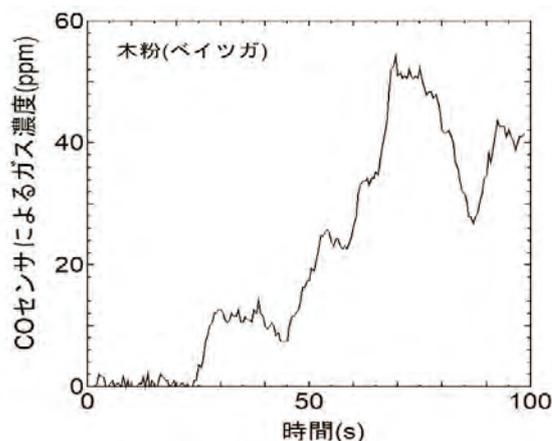
実験は、昇温、等温の条件で行った。

・昇温実験：室温から 320 °C まで一定速度で昇温させながらセンサの応答性・出力を調べる。ヒータの加熱性能を考慮し、昇温速度を 16 °C/min とした。

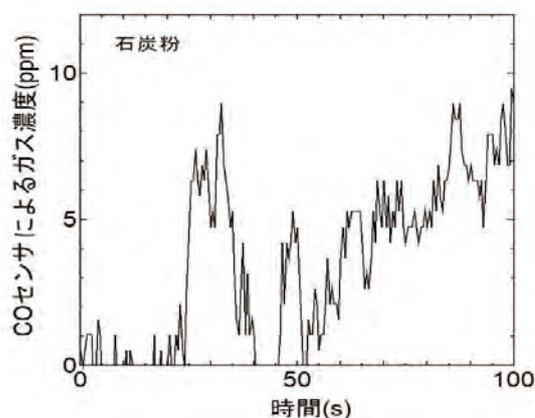
・等温実験：ホットプレート上の熱面温度を 270°C あるいは 400 °C に固定し、試料を速やかに載せてからセンサの応答性・出力を調べた。270 °C と 400 °C に設定したのは、TG-DTA 分析の結果、400 °C までに熱分解する試料が多かったためである。

実験を行うと、熱分解ガスや燃焼生成ガス、煙粒子がガラス内壁に付着する。そこで、毎回の実験の後には洗浄のため、エタノールを浸したウエスでガラス内壁をふき取り、ドライヤで乾燥させるようにした。

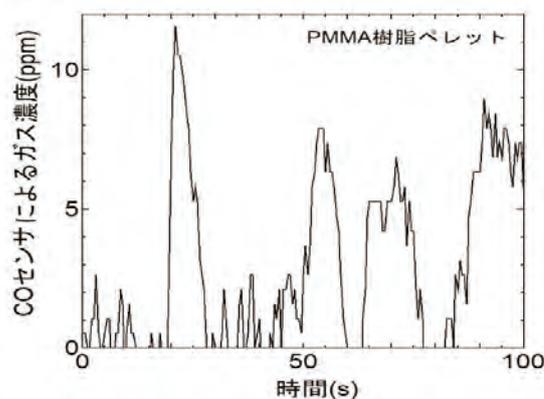
## 2) 実験結果および考察



(a)木粉 (ベイツガ)



(b)石炭粉



(c)PMMA 樹脂ペレット

図4 等温実験での CO センサによるガス濃度の変化 (400°C)

### (1) 昇温実験でのガス検知

図3に石松子、木粉 (ベイツガ)、PMMA 樹脂ペレットの CO センサによるガス濃度の変化を熱面温度に対して示す。ここで時間に関しては、データロガーの記録開始 (0 s) 後、10~15 s で試料を熱面に載せ始め、約 20 s で試料搭載が完了するようにした。3 試料とも濃度曲線が重なっており、同様の濃度変化をすることがわかる。常温でも出力に数 ppm の細かい変動 (ノイズ) がみられる。CO センサで検知されるガスはほとんどが CO と考えられるが、センサの出力の大きさや変化、CO 濃度計の測定、そして定温実験の結果からすると、必ずしも

表2 定温実験でのセンサ検知, CO濃度計, TGの測定結果

番号	試料	質量, 寸法等	270℃			400℃			TGによる減量開始温度(交点温度)(℃)
			においセンサ検出(有りの場合○)	COセンサによるガス濃度(ppm)	CO濃度計によるCO濃度(ppm)	においセンサ検出(有りの場合○)	COセンサによるガス濃度(ppm)	CO濃度計によるCO濃度(ppm)	
1	石松子	0.2g	○	5	0	—	—	—	243
2	木粉(バイツガ)	0.2g	○	6	0	○	54	220(1100ppm/試料1g)	246
3	おがくず(ヒノキ)	0.2g	○	6	0	○	21	70(350ppm/試料1g)	280
4	木質ペレット	2.4g, 5個	○	6	0	○	11	30(12.5ppm/試料1g)	-
5	コーンスターチ	0.2g	○	5	0	○	11	0	294
6	小麦	0.88g	○	5	0	○	13	30(34ppm/試料1g)	-
7	小麦フスマ	0.2g	○	6	0	○	43	150(750ppm/試料1g)	263
8	大豆	1.3g, 5個	○	5	0	○	11	0	-
9	大豆粉	0.2g	○	5	0	○	16	90(450ppm/試料1g)	206
10	小豆	1.2g, 8個	○	9	0	○	8	0	-
11	コピー用紙	0.1g, 35×35mm	×	6	0	○	12	0	305
12	ダンボール紙	0.2g, 20×20mm	○	8	0	○	17	50(357ppm/試料1g)	278
13	石炭粉	0.2g	×	7	0	○	10	0	420
14	コークス粉	0.2g	×	6	0	○	12	0	657
15	RPF	3.1g, 1個	○	7	0	○	10	0	-
16	PMMA樹脂ペレット	1.0g	○	7	0	○	12	670(670ppm/試料1g)	287
17	PE樹脂ペレット	0.65g	○	7	0	○	45	200(308ppm/試料1g)	267
18	PPシート	0.12g, 25×25×0.2mm	○	9	0	○	10	60(500ppm/試料1g)	262
19	PVCシート	0.11g, 13×13×0.5mm	○	6	0	○	11	40(364ppm/試料1g)	261
20	NR(天然ゴム)シート	0.37g, 12×15×1.0mm	○	6	0	○	9	0	255
21	硬質ウレタンフォームA	0.12g, 20×20×5mm	○	6	0	○	9	0	312
22	硬質ウレタンフォームB	0.10g, 20×30×8mm	○	5	0	○	8	0	317
23	難燃性硬質ウレタンフォーム	0.14g, 16×20×7mm	○	6	0	○	11	50(357ppm/試料1g)	217,485
24	電線ケーブル(単芯)A	0.40g, 直径3.3mm×18mm	×	7	0	○	9	30(75ppm/試料1g)	-
25	電線ケーブル(5芯)B	13g, Φ6.5×20mm	○	8	0	○	8	0	-
26	木粉(バイツガ)+水	粉0.2g+水1.0g	○	6	0	—	—	—	-

CO ではないことが推測される。

表 1 に、おいセンサの検知温度、その温度での CO センサの測定濃度、TG（熱重量分析）の熱重量開始温度の測定結果を示す。おいセンサは 3 試料とも 250℃ 付近で検知している。TG による減量開始温度（交点温度、外挿温度、ここでは熱分解温度）が 250℃ 付近であるので、熱分解ガスをおいセンサが正しく検知していると考えられる。おいセンサが感知したときの温度では、CO センサのほうも微量のガスを検知していることがわかった。

## (2) 等温実験でのガス検知

燃焼性状については、実験に用いた粉状のものは発火しても火炎を形成せず、くん焼する。図 4 に CO センサによるガス濃度の変化を示す。ここで、図の横軸の時間は試料を熱面に載せてから計時したものではなく、データロガーの記録開始からの時間である。木粉（ベイツガ）では、熱面に載せるとすぐにくすぶり始め、ごく短時間に CO センサに出力がみられるようになる。石炭粉は燃焼せず、PMMA 樹脂ペレットは熔融し、煙（ガス蒸気）が発生するのみで燃焼していない。

木粉（ベイツガ）やおがくず、小麦、大豆粉など、くん焼する試料では質量あたりの CO 濃度が高い傾向を示すことがわかった。また、実験で用いたプラスチック類は粉状ではないものの、質量あたりの CO 濃度が 300～700 ppm で、特に PMMA 樹脂ペレットの濃度が高いことがわかった。

表 2 に測定結果をまとめて示す。おいについては、270℃ で検知されない試料でも 400℃ では検知されることがわかった。コピー紙が 270℃ でおいを検知しないのは、試料量が少なかったためと考えられる。TG-DTA 分析によると、石炭粉とコークス粉は 270℃ では TG、DTA に変化はなかった。270℃ で検知されない試料は、TG 測定によると、減量開始温度が概ね 270℃ よりも高いものである。270℃ での CO センサの出力についてみると、10 ppm 以下のガスが検知されるが、CO 濃度計では検知されていないことから、10 ppm 以下はセンサあるいは回路のノイズと考えられる。400℃ において CO センサと CO 濃度計の濃度に大きな違いがみられることから、その差の原因に検討を要する。濃度場の不均一性の影響も一つの原因と考えられる。

## 3) CO<sub>2</sub> センサの適用性

CO<sub>2</sub> センサについては熱面実験では検知しないことがわかった。おそらく、熱面実験では試料がくすぶるだけで不完全燃焼するため、CO に比べて CO<sub>2</sub> の発生が少ないためと考えられる。そこで、火炎が形成するように小ガス炎で試料に着火させてみたところ、CO<sub>2</sub> を検知することが確認できた。このことから、本研究で対象とする、貯蔵時のくん焼を呈する初期火災検知には CO<sub>2</sub> センサが不適であることがわかった。

## 4) 熱面実験のまとめ

用いたおいセンサは、試料が加熱される際に発生する熱分解ガスや燃焼生成ガスなどに含む、なんらかのにおい成分を検知していることが確認できた。応答性については、火災を検知するのに十分な性能を有している。用いた試料については 400℃ で、おいを検知した。しかし、CO 濃度についてはほとんど変化しないものがあった。CO 濃度はくん焼の有無など、試料そのものの燃焼性に依存すると考えられる。

おいセンサの TGS2600 と TGS2602 について 10 試料を選び、比較実験を行った結果、前者の TGS2600 のほうが本研究の試料において検知性が良いことがわかった。

以上より、燃焼管実験と堆積実験では、おいセンサとして TGS2600、CO センサ (TGS5042-A00) を採用し、CO<sub>2</sub> センサを実験の対象から外した。

## 4. 燃焼管を使った実験

### 1) 実験装置および実験方法

#### (1) 実験装置

図 5 に実験に用いた燃焼管の様子を示す。燃焼管はステンレス製、内径 200 mm×長さ 1,200 mm で、底部を閉じ、上部を開の状態では鉛直に設置し、内部に試料を一定高さまで充てんした。図 6 に試料を充てんした様子を示す。加熱着火用の電線として、ニクロム線（600 W タイプ、線コイルの直径 5 mm、加熱部の長さ 30 mm と 1000 mm）を用いた（図 7）。電線の被覆からのおい発生をなくすため、ニクロム線の両端を被覆なしの銅線（線径 1 mm）と結線した。加熱電線は底部から 50 mm の高さ、中心軸付近に設けた。温度測定のため、K 型熱電対（シース型、直径 1.6 mm）を底部から 100 mm、

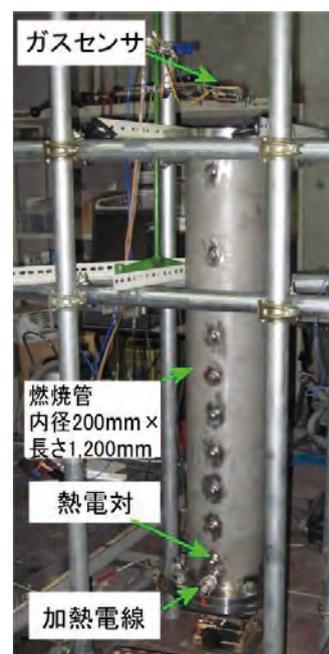


図 5 燃焼管を使った実験の様子



(a)木質ペレット



(b)石炭

図6 試料の堆積の様子



(a)加熱部長さ 30mm



(b)加熱部長さ 100mm

図7 加熱用ニクロム線の様子

すなわち、ニクロム線加熱部より 50 mm 上方に設置した。主な測定ではガスセンサと気相用の熱電対は燃焼管の上端から 60 mm 上方、開放空間に設置した。

## (2) 実験条件・実験方法

本実験の試料として、木質ペレット、RPF、PMMA樹脂ペレット、石炭(塊)を用いた。ニクロム線を通電加熱し、試料に着火させ、実験時間中は通電加熱を継続した。ニクロム線の通電電圧は同じ長さでは毎回、同程度の赤熱になるように調整した。放射型2色温度計による非接触測定によると、表面温度は850℃程度であった。

着火の初期段階では煙の発生はほとんどないため、燃焼管上方に設置してある局所排気装置は作動させず、ほぼ無風状態で実験を行った。

においセンサとしては、熱面実験で検知能力が高かったTGS2600を使用した。基本的なセンサの設置方向は基本的には、においセンサの通気孔が下方、堆積層方向を向くようにした。

いくつかの実験では熱画像カメラを用い、堆積層の上面の温度分布を測定した。

## 2) 実験結果および考察

### (1) 温度とガスの時間変化

図8に木質ペレットについての測定結果を示す。ただし、木質ペレット 5 kg、堆積層の平均高さが 140 mm の場合である。測定時間は着火から 2 h (=7,200 s) とした。加熱を開始してもしばらくはガスセンサの出力、層内の温度に変化はなく、638 s 経過後、においセンサ

が検知して電圧が H から L レベルになり、その後はにょいを継続的に検知している。CO センサはそれより 8 s 遅れて検知している。CO は 880 s 付近で 150~200 ppm の濃度を検出しているが、単調増加するわけでないことがわかった。CO 濃度計の測定でも 100 ppm を超え、さらに携帯型 CO モニタ、マルチ型ガスモニタのいずれも CO 濃度が上昇し、警報を発した。実験中、目視では煙の発生は認められなかった。

温度変化については、y=100 mm (ニクロム線より 50 mm 上方) の温度は 1,700 s 付近から上昇を開始する。このことからくん焼による燃え拡がりや熱が伝わる速度が 0.030 mm/s (1.8 mm/min) 程度と見積もることができる。燃焼管上端から 60 mm 位置での温度はほぼ一定であった。

図9に熱画像カメラによる堆積層上面の温度分布を示す。温度分布は 5,017 s の時のものである。熱画像によると、堆積層上面の円形の輪郭が確認できるが、局所的に温度が高い領域は見られない。燃え拡がりの初期段階では、層内で発生する周囲よりも高い温度の燃焼生成ガスや熱分解ガスが通り抜ける箇所を熱画像で見つけ出すことは困難といえる。

図10と11にはRPFについて、それぞれ加熱開始からの温度・ガス濃度の変化と熱画像カメラによる堆積層上面の温度分布を示す。RPFについてはCO濃度が相当高い状態で変動しながら推移する。RPFでは堆積層の空隙が大きく、熱分解ガスや燃焼生成ガスが流動しやすいことから、対象となるガスが早くセンサ位置に達し

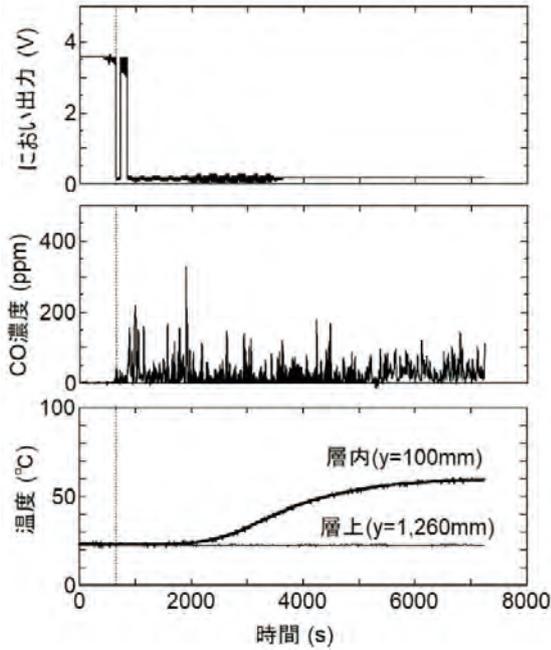


図8 加熱開始からの温度・ガス濃度の変化  
(木質ペレット 5 kg, 堆積層の高さ 140 mm, センサ位置は堆積上面から 1,120mm, ニクロム線長さ 30mm, におい検知時間 638s)

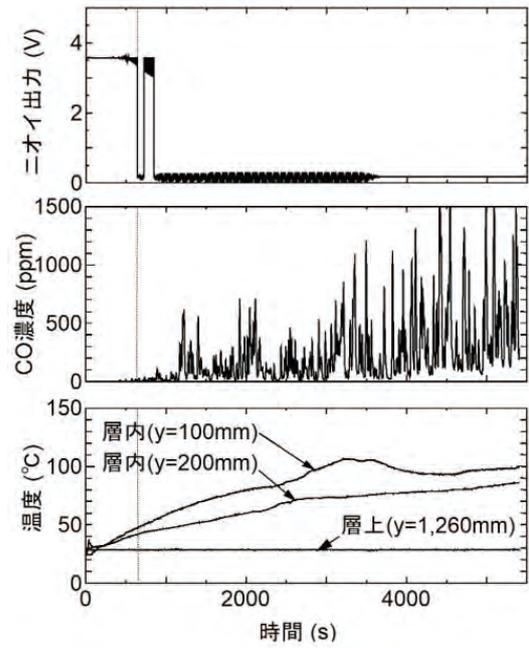


図10 加熱開始からの温度・ガス濃度の変化  
(RPF10kg, 堆積層の高さ 400mm, センサ位置は堆積上面から 860mm, ニクロム線長さ 30mm, におい検知時間 402s)

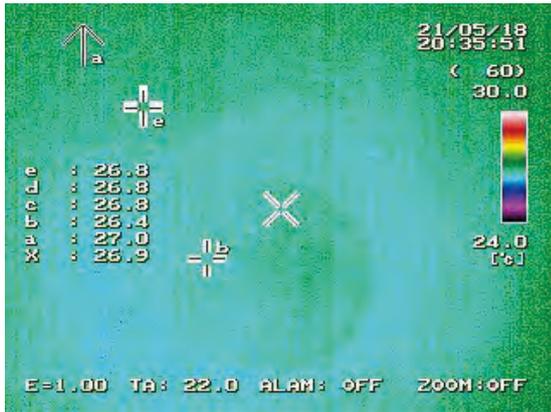


図9 木質ペレット堆積層上面の温度分布  
(熱画像, 5,017s)



図11 RPF 堆積層上面の温度分布  
(熱画像, 3,600s)

たとえられる。熱画像カメラによる 3,600 s での堆積層上面の温度分布によると、木質ペレットの場合と同様に局所的に温度の高い箇所は見られない。

図 12 と 13 にそれぞれ PMMA 原料樹脂ペレットと石炭について、加熱開始からの温度・ガス濃度の変化を示す。検知までの時間は試料、堆積状態によって異なるが、いずれもにおいが CO 濃度上昇よりも早く検知していることがわかった。石炭については、におい検知時間が 2,924 s とほかの試料比べて長く、おそらく加熱用のニクロム線が石炭に接触していないことから、着火まで時間を要したものと考えられる。

## (2) 実験後の燃焼物の様子

実験後に燃焼管の底部を開いて内容物を取り出してみた。図 14 にその様子を示す。木質ペレットが燃焼した範囲は不明であったが、RPF については長さにして

5~8 cm の領域で炭化していることがわかった。石炭については、丸で囲った部分が炭化しているのみであった。PMMA 原料樹脂ペレットについては、直径 10~11 cm 程度の球形で熔融・固着していた。これをバンドソーで半分に切断したところ、内部は洋梨形に熔融していた (図 14(e))。熔融固着面は密であり、おそらく、加熱により一定距離までは熔融するが、熱分解ガスや燃焼生成物が熔融固着領域の流動を阻害されることがセンサの検知、濃度変化に影響しているものと考えられる。

## (3) 堆積高さ と 検知時間

試料の堆積高さ と センサの高さを変えて、検知時間  $t_d$  を調べた結果を図 15 に示す。ここで、 $y$  はニクロム線の高さを基準にしたセンサの設置高さ (=ニクロム線とセンサの距離) で、 $y =$  堆積高さ - ニクロム線の高さ (50 mm) から求められる。堆積層上面とセンサの間の

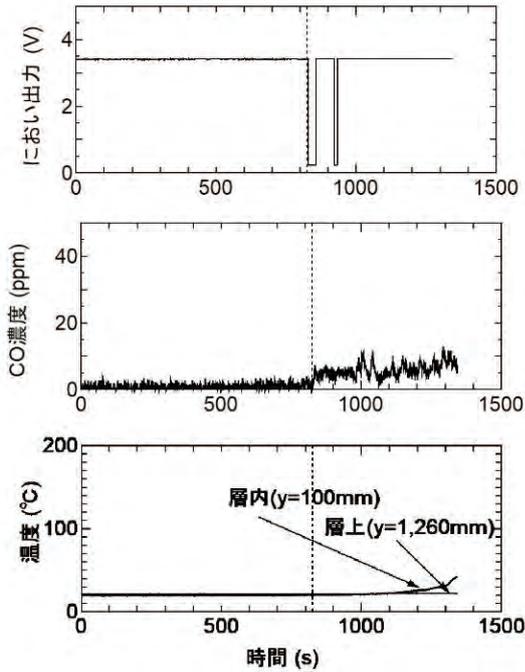


図12 加熱開始からの温度・ガス濃度の変化  
(PMMA 原料樹脂ペレット 10kg, 堆積層の高さ 380mm, センサ位置は堆積上面から 880mm, ニクロム線長さ 30mm, におい検知時間 857s)

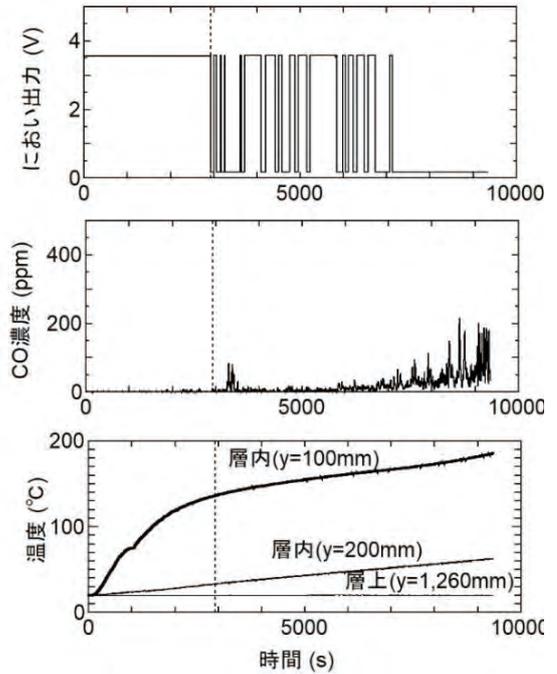


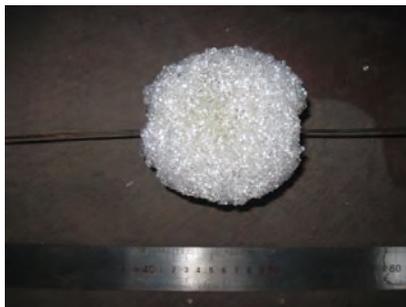
図13 加熱開始からの温度・ガス濃度の変化  
(石炭 10kg, 堆積層の高さ 400mm, センサ位置は堆積上面から 860mm, ニクロム線長さ 30mm, におい検知時間 2,924s)



(a)木質ペレット

(b)RPF

(c)石炭



(d)PMMA 原料樹脂ペレット  
(溶融して球状に固化している)



(e) (d)を半分に切断した様子

図14 実験後のニクロム線付近の試料の様子

気相の距離(高さ)を  $H_g$  とする. また, ニクロム線の長さを  $N$  とする.  $N=30$  mm の木質ペレットの測定では,  $H_g=860$  mm を一定として, 堆積高さ, すなわち,  $y$  を 3 段階に変えて測定した. 測定結果によると,  $y$  とともに  $t_d$  が増加すること, その変化は木質ペレットと PMMA 樹脂ペレットの  $N=30$  mm (○印) についてみ

ると, 線で示したように二次曲線に近いことがわかった. 木質ペレットについて,  $N$  が 100 mm (◎印) に対して  $H_g$  がほぼ等しい条件の 30 mm (○印) と比較すると,  $t_d$  は小さく(時間が短く)なる. 石炭については上述のように検知時間が長い. 本実験によると, 検知時間は次式のような時間の合計と考えられる.

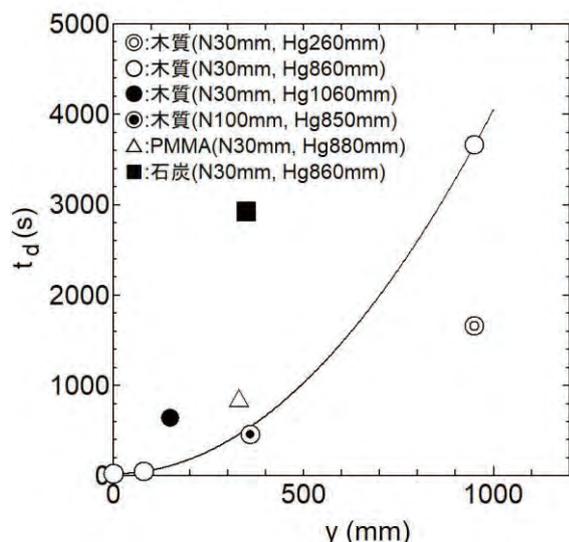


図 15 y と  $t_d$  の関係

$$t_d = \text{センサ検知に必要な量のガスの発生時間} \\ + \text{堆積層（固気相）内のガスの通過時間} \\ + \text{気相のガスの通過時間} \quad (1)$$

石炭の場合は大きな塊であるので、先の 1)(1)で述べたようにセンサ検知に必要なガスの発生時間が長いようである。粉体になった場合にはニクロム線での加熱される量が増え、 $t_d$  が小さくなることが推測される。

発生したガスが堆積層を上方に向かって流動する間、そのガスが堆積物に付着や吸着すると、センサ検知に必要なガスの量が減少する可能性がある。このことで  $t_d$  が変化すると考えられる。

ニクロム線での加熱領域が小さいと、炭化、さらには燃焼する量は少なく、温度差で誘起される自然対流は小さいと推測される。そのため、ニクロム線加熱当初、試料の熱分解、燃焼で発生するガスは主に分子拡散によってセンサに達することになる。実験温度で空気中の当該ガスの拡散係数を推算すると、Fuller らの式<sup>7)</sup>より 23℃空気中の CO は  $0.20 \text{ cm}^2/\text{s}$  である。同様ににおいて関係するアルコール（例えばエタノール）については  $0.12 \text{ cm}^2/\text{s}$  である。これらの値からすると、気相について  $H_g=880 \text{ mm}$  でのにおい成分の分子の拡散でセンサ位置までの到達に 7～12 分程度の時間を要することが推測される。

#### (4) センサの設置方向

センサの取り付け方向を 90°傾けて、燃焼管の内壁に鉛直に設置してみたが、検知性に変化はなかった。このことから、ガス検知に関して、センサを側壁に沿って設置しても問題がないと考えられる。

#### 3) 燃焼管を使った実験のまとめ

実験の結果、用いたにおいセンサと CO センサは、ニクロム線の加熱によって生じる熱分解ガスや燃焼生成ガスを早期に確実にとらえていることがわかった。このと

き、においが先に検知され、次に CO 濃度が増加し始め、CO 濃度の変動しながら徐々に増加する傾向がみられる。堆積物が燃焼や熱分解など何らかの熱的な事象、異変が発生したと判断できる。

実験の結果を試料の堆積高さや検知時間の関係として整理した。検知時間は、堆積高さとともに長くなる（遅くなる）こと、ガスの発生が多いと短くなる（早くなる）こと、などがわかった。検知時間が長くなったとしても、検知した時点の堆積物が燃焼する領域、燃焼量はわずかである。

## 5. 堆積実験

### 1) 開放空間の堆積実験の実験装置および実験方法

#### (1) 実験装置

本実験では白玉砂利 1.8 t を用い、実験室内の床にブルーシートを敷き、その上に堆積させた。図 16 に堆積実験における測定点①～③の位置を示す。測定点は実測の堆積高さ 0.63 m を基準に定め、位置①は実測の堆積高さ 0.63 m 上方、位置②と③は堆積外周から 0.63 m とした。測定対象は、においと CO ガスとし、燃焼管実験と同じ種類のセンサを用いた。模擬ガスとしては、木質ペレットのくん焼による燃焼生成ガスを用いた。ガスを発生させるため、透明窓付きの小型容器内に木質ペレットを充てんし、ニクロム線で加熱し、くん焼させ、生成する燃焼ガス（煙を含む）を空気流に同伴させた。くん焼の状況は容器窓から確認し、ニクロム線の加熱と停止を適宜切り替えた。ここでは木質ペレットの単位時間の燃焼量、燃焼生成ガスの濃度は測定しなかった。

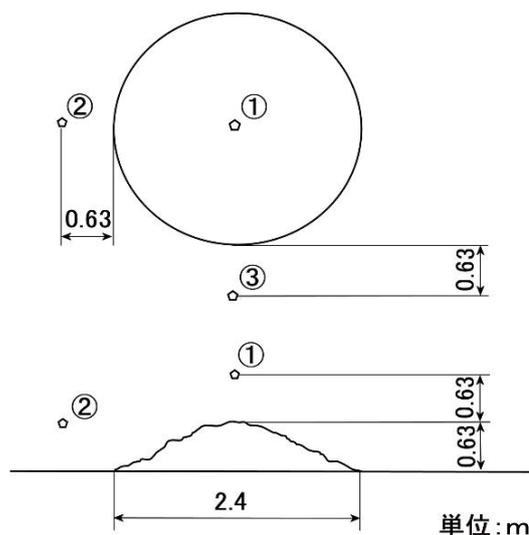


図 16 開放場の堆積実験における測定点の位置

(注) 換気口からの微風の方向は図の右から左:①→②の方向)

図 17 に燃焼生成ガス吹き出し用パイプの先端の様子を示す。直径 10 mm のパイプの先端を鋭角に加工し、側面に直径 6 mm の吹き出し口を設けた。このパイプを



図 17 吹き出し用パイプ先端の様子

堆積層床面から 0.15 m、中心軸位置に堆積層の水平方向から差し込んだ。燃焼生成ガスは上方に吹き出す。

### (2) 実験方法

供給する空気流量は 16~20 L/min の範囲で調整した。ただし、この値は本実験で任意に定めたものである。このときのパイプの吹き出し速度は測定していないが、計算上の吹き出し速度は 9.5~12 m/s となる。

実験室内の気流をアネモスタ風速計（モデル 6141、日本カノマックス製、最小 5 cm/s）で測定した結果、5 cm/s 以下であった。静止気流と判断できるが、実験中、実験室の換気扇（排気口）は止めた状態で行っていても、吸気口から一定方向に流入する空気の流れ（微風）があることがわかった。

### (3) 実験結果および考察

図 18 に空気の供給を始めてからのセンサ検知の状況を示す。供給空気量は 16 L/min である。初めににおいを検知するのは位置②であった。その後、においが無くなり、時間が経過した野に再び位置②で検知し、少し後で位置①が検知する。位置③は検知しなかった。水平方向の位置②が早く検知するのは、一定方向の微風の影響と考えられる。位置②でにおいが検知された時点では CO センサの濃度は低く、微小変動のノイズしかみられない。しかし、その後、短時間スパイク状で 50 ppm を

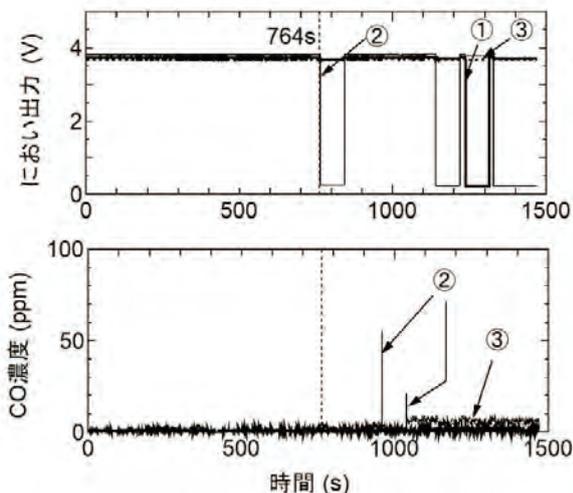


図 18 開放空間に堆積させた場合のにおいと CO の時間変化（白玉砂利 1.8t、木質ペレットのくん焼、供給空気量 16L/min）

超える高濃度の CO が検知される。位置③の CO センサが位置②のそれとともにわずかに感知している。位置①のセンサの CO 濃度は低い。

供給空気量が 20 L/min の吹き出し速度が大きい場合は、堆積層の上方にある位置①のにおいセンサが初めに検知することがわかった。

いずれの実験より、開放空間では風下側ではにおいと CO が検知できるが、センサの位置によっては検知が難しいことが推測された。

実験終了後に堆積層をかき出したところ、燃焼生成ガスの吹き出し口に付近の白玉砂利が茶に変色していた。すなわち、燃焼生成ガスが白玉砂利に接触すると、冷えて液化、タール状になり、それが白玉砂利に付着する。そのため、実際に堆積層外に排出される燃焼生成ガスの量は、供給した空気流量から推測される量よりも少なくなると考えられる。

## 2) タンクの堆積実験の実験装置および実験方法

### (1) 実験装置

図 19 にタンクの外観と白玉砂利を充てんした様子を示す。白玉砂利は約 0.3 t ずつフレキシブルコンテナバックに積み、実験室天井に備え付けてあるホイスト式



(a)外観



(b) 白玉砂利を堆積させた様子

図 19 タンクの様子（容量 2.1m<sup>3</sup>、高さ 3.2m、円筒部長さ 2.5m×内径 1.0m）

クレーンを使って合計 18 t をタンクに充てんした。充てんした堆積高さは円筒部下端から 113 cm、堆積層上面からタンク上端まで 137 cm である。タンク上部にはふたを取り付けるが、密閉せず最大 2 cm 程度の間隙を設けた。

センサは、においセンサと CO センサで開放場の実験で使用したものと同一である。センサ設置の位置①は上ふた内壁の中心（堆積層上面から 140 cm）、位置②は内側側壁で円筒部上端から 50 cm（堆積層上面から 87 cm）とした。

燃焼生成ガスの吹き出しパイプは円筒部下端から 5 cm の高さから水平に差し込み、円筒の中心軸から上方に吹き出すようにした。これに合わせて、熱源を模擬するため、最高温度 870 °C の高温カートリッジヒータを吹き出しパイプそのそばに円筒の反対側から差し込んだ。熱源としてはヒータ表面温度が 800 °C になるように電圧を調整した。

## (2) 実験方法

本実験では、開放空間の堆積実験で使用した白玉砂利を再利用した。供給する空気の流量は開放場の堆積実験と同じ、16 ~ 20 L/min である。

初めにカートリッジヒータの加熱（熱源）なしでにおいと CO の応答性、検知を調べた。その後、熱源ありで同様に調べた。実験を行うに際して、燃焼生成ガスがタール状になり、それが付着した白玉砂利を一度排出して洗浄は行わず、実験を続けた。

## (3) 実験結果および考察

図 20 に供給空気流量 16 L/min におけるタンク内のおいと CO の時間変化の測定結果を示す。ただし、熱源なしである。においセンサが検知するよりも前に CO 濃度が増加していることがわかった。においが初めに検知したのは位置②で、CO 濃度が高かった位置②のほうで、堆積層上面に近いほうが先に検知することがわかった。CO 濃度の変化は燃焼管実験とは異なり、濃度の短時間の変動がなく、時間とともに増加する。

図 21 に供給空気流量 20 L/min、熱源ありの結果を示す。この実験では前の実験で堆積層内に CO が滞留した状態になり、層内に新鮮な空気を供給しても局所的に CO が残った状態にあった。そのため、図の位置①と②の CO 濃度は 0 ではない状態からスタートしている。においセンサが検知する時間で位置②の CO 濃度が増加を初めている。検知時間は図 18 の条件よりも早いことがわかった。この場合も、CO 濃度は短時間の変動なく、増加している。いずれにしろ、閉空間に近いタンク内ではセンサの設置位置によらず、吹き出した燃焼生成ガスを確実に検知できることが確認できた。

## 3) 堆積実験のまとめ

開放空間の堆積層内で燃焼生成ガスが発生する場合には、においセンサと CO センサの検知・応答性はセンサの設置位置に依存する。密閉あるいは密閉に近い閉空間にあるタンクの堆積層内から燃焼生成ガスが発生する場

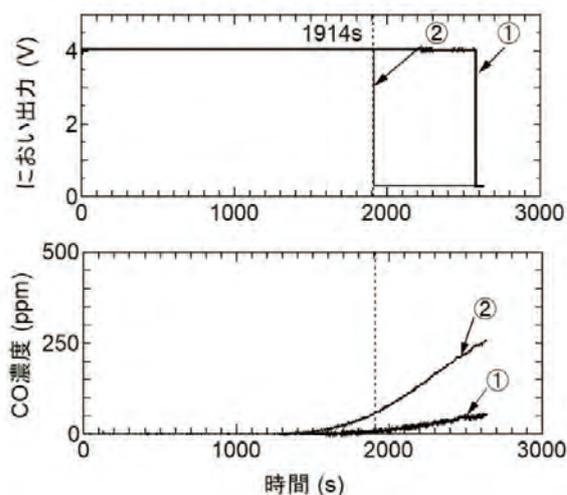


図 20 タンク内のおいと CO の時間変化  
(供給空気流量 16L/min, 熱源なし)

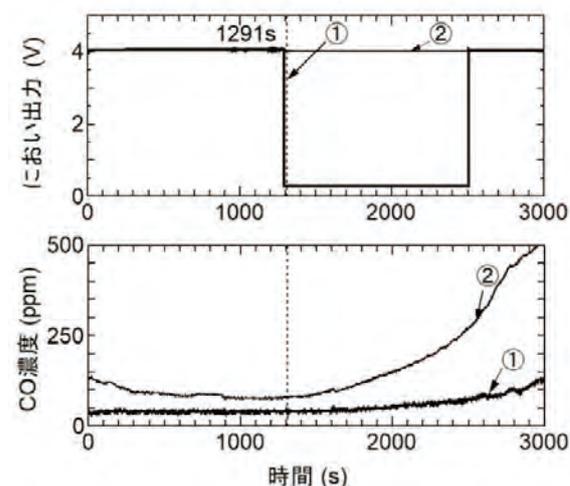


図 21 タンク内のおいと CO の時間変化  
(供給空気流量 20L/min, 熱源あり)

合には、においと CO を確実に検知できる、おそらく、燃焼管実験の結果からすると、タンクの寸法にもよるが上部が開放した状態でもにおいと CO を検知できるものと考えられる。

## 6. まとめ

本研究では、可燃性の粉粒体を扱う貯槽に取り付ける火災検知用のセンサに関する知見を得るための検証実験を行った。センサとしては、においセンサ、CO センサなどを用いた。実験として、熱面実験、燃焼管を使った実験、タンクを使った堆積実験などを行った。においセンサと CO センサが初期火災検知に有効であることが確認できた。熱画像カメラによると、初期火災検知には不向きであることがわかった。

① 熱面実験によると、用いたにおいセンサは、試料が加熱される際に発生する熱分解ガスや燃焼生成ガスなどに含む、なんらかのにおい成分を検知し

ていることが確認できた。応答性については、くん焼を呈する火災を検知するのに十分な性能を有していることがわかった。

- ② 可燃性粉粒体の貯蔵時に堆積層内で発火した場合は、火炎が形成せず堆積層内でくん焼する、くん焼では CO に比べて CO<sub>2</sub> の発生は少ない。そのため CO<sub>2</sub> センサは初期火災検知には不向きである。
- ③ 燃焼管実験において、実際に堆積層内でくん焼させた場合、においセンサと CO センサは熱分解ガスや燃焼生成ガスを早期に確実にとらえられることがわかった。このとき、においが先に検知され、次に CO 濃度が増加し始め、CO 濃度が変動しながら徐々に増加する傾向が見られる。このような変化が見られる場合は、堆積物が燃焼や熱分解など何らかの熱的な事象、異変が発生したと判断できる。
- ④ 試料の堆積高さや検知時間の関係として整理した結果、センサの検知時間は、堆積高さとともに長くなる（遅くなる）こと、ガスの発生が多いと短くなる（早くなる）こと、などがわかった。
- ⑤ 開放空間の堆積層内で燃焼生成ガスが発生する場合には、においセンサと CO センサの検知・応答性はセンサの設置位置に依存する。密閉あるいは密閉に近い閉空間にあるタンクの堆積層内から燃焼生成ガスが発生する場合には、においと CO を確実に検知できる、おそらく、燃焼管実験の結果からすると、タンクの寸法にもよるが上部が開放した状態でもにおいと CO を検知できるものと考えられる。

本検証実験において、焦臭さを感じない低濃度の、においとともにおいセンサと CO を検知することで、発火直後のごく初期段階の事象を的確に検知できることを確認した。このようなガスセンサを使うことで、異常発生から火災拡大までをとらえられることが可能である。しかし、適用には問題点とさらなる課題も見出された。実験によると、測定器やセンサの測定レンジを超過するガス濃度に達することがありえるため、より広い濃度範囲を測定できるものや、レンジ切り替えが可能なものが必要である。また、熱対策も必要である。火災の進展で周囲が高温となり、センサ素子の熱的特性によっては正常な出力値を逸脱し、結果として誤った判断をすることが懸念される。さらに、長期使用において誤作動を起こさない、耐久性が求められる。使用する雰囲気によっては、防爆性能が求められるかもしれない。実際に可燃性の粉粒体が貯蔵された状況では、貯槽の寸法に応じたセンサの数と設置場所を定める必要があり、本研究の結果だけでは情報が不足している。トラブル対処に資するセンサ、モニタリングの実用化に向けて、引き続き研究に取り組んでいきたい。

## 参 考 文 献

- 1) 水谷高彰, 八島正明. 産業現場での爆発・火災におけるモニタリング方法の問題点について. 安全工学シンポジウム 2019 講演予稿集. 2019; 334-335.
- 2) 崔原栄, 大森大助, 伊藤隆政, 高橋克巳, 田中昭洋. 低位炭(亜瀝青炭)の貯蔵および運搬技術・サイロ貯炭の昇温試験とその昇温挙動の数値解析. IHI 技報. 2016; 56 4: 38-45.
- 3) 宮崎 習. 石炭サイロ発熱監視装置の研究開発. 四国電力四国総合研究所 研究期報. 2018; 109: 14-21.
- 4) 辻 優作, 江鐘偉, 趙嘉斌, 松本佳昭, 森信彰. においセンサを用いた火災早期予測法の開発. 日本機械学会, 福祉工学シンポジウム講演論文集. 2008; 112-115
- 5) 上矢恭子, 須川修. においによるプラスチック廃棄物の火災感知に関する研究. 平成 21 年日本火災学会研究発表会概要集. 2009; 128-129.
- 6) 英国 HSE. Risk of carbon monoxide release during the storage of wood pellets, <https://www.hse.gov.uk/safety-bulletins/> (最終アクセス日 2021 年 5 月 7 日)
- 7) Poling, B. E., Prausnitz, J. M., and O'Connell, J. P. The properties of gases and liquids, 5th Ed. McGraw-Hill. 2001; 11.9-11.13.