

# ガスセンサによる可燃物貯蔵設備内の熱分解ガス検出 - 検出性能および設置位置の評価 -†

水谷 高 彰\*1 斎 藤 寛 泰\*2

本研究では、貯蔵設備における可燃性物質の爆発・火災の兆候検知を目的としたガスセンサ選択および検知能力評価方法を実験的に示した。TG-DTA 計測で試料の熱分解開始温度を確認するとともに、試料片の加熱により発生するガスを分析する実験装置を製作し、熱分解開始温度近傍での熱分解ガスの経時変化を FT-IR ガス分析装置で計測した。また、同加熱装置を用いて、センサの熱分解ガス検知性能を評価し、有効なセンサの選択方法および検知性能を明らかにした。今回使用した試料とセンサの組み合わせでは、より低温で兆候を検知するためには空気の汚れセンサが最も有効であった。空気の汚れセンサへの外乱の影響を考慮すると、早期検知のために空気の汚れセンサで検知を行い、誤検知の抑止のために可燃性ガス用のセンサなどを併用することが兆候検知のための良い組み合わせであることを示した。さらに、火災シミュレータである FDS を用いて充填物やガス発生位置とセンサ設置位置の関係がガス到達時間に与える影響の一例を示し、FDS がガスセンサの最適位置の検討に有用であることを示した。

**キーワード:** 貯蔵設備, 異常発熱, 火災, 熱分解ガス, ガスセンサ, FDS.

## 1. はじめに

産業現場（事業場）では化学設備などの異常な温度上昇や煙の発生など、通常の運転条件からの逸脱等（トラブル）が認められると、マニュアルなどに従ってトラブル対処作業が実施される。迅速かつ適切なトラブル対処作業は、被害を最小限に止めるために必要不可欠なプロセスであり、年々その重要性が注目されている。厚生労働省では近年の化学工場の災害を受けてトラブル対処作業を含めた化学設備の非定常作業の安全衛生対策のガイドラインを見直しているが<sup>1,2)</sup>、トラブル対処作業は、緊急を要するために従業員が直接関わることにより、非定常作業の中でも事業場の従業員が被災するケースが多い作業とされている。

ホームページ上で公開されている爆発・火災災害の報告書の内、原因および災害に至るまでの経緯が明確な報告書で、モニタリング方法に問題点が認められた災害調査報告書<sup>3-11)</sup>を精査すると、以下の2種類に大別されることが分かった。

### ・モニタリングの不備

爆発・火災の原因物質である可燃性ガスの発生や漏洩のモニタリングが行われていなかった（センサの位置などモニタリング方法が不適切で計測が出来なかった事例も含む）事例である。可燃性の気体や蒸気、可燃性固体の熱分解により発生した可燃性ガス

が貯槽や事業場内に充満した事例である。これらの事例では、可燃性ガスの発生などにより、爆発性雰囲気形成されていたが、トラブル対処作業にあたった従業員は、その状況を早期に把握することが出来なかったため、対応が遅れたり高温物や静電気放電などの着火源を持ち込んだりしたことにより、被災したものである。

### ・モニタリング結果の評価の誤り

爆発・火災の原因物質である可燃性ガスの発生や漏洩のモニタリングは行われていたが、爆発・火災の兆候であることを評価できなかった事例である。今回調査した事例では原因物質は全て液体であった。温度計測やガス濃度などの異常が計測されたが、適切なトラブル対処作業が行えなかった事例である。

これらの事例では、適切なモニタリング（ガスセンサによる計測など）が行われていれば、火気を持ち込みを禁止したり、ガス濃度が安全領域に低減するまで待避したりするなどの対策が取れた可能性が高い。

一般に、粉体可燃物の堆積層内では化学反応によるわずかな発熱が蓄積することで局所的な温度上昇が持続し、発火、くん焼に至る場合があることが知られている<sup>12)</sup>。この発熱や発生ガスのモニタリングは、爆発・火災の兆候を検知するための有効な手段であるが、用いるセンサやそれらの設置方法が重要であると考えられる。

固体可燃物が充填された設備内で生じるこのような異常の兆候を検出する方法としては、充填層内の温度上昇を直接計測する方法、温度上昇によって生じる熱分解ガスを計測する方法などが挙げられる。有機物が熱分解・燃焼した場合には一酸化炭素、二酸化炭素は必ず発生し、他にも化学組成固有のガスが発生することが知られており、燃焼条件下（500℃以上、空気雰囲気下）での代表的な高分子物質の熱分解ガスが明らかになっている<sup>13)</sup>。しかし、熱分解ガスを爆発・火災の兆候を捉えるために活用することを考えた場合、早期に生成される成分を検

† 本報の一部は、安全工学シンポジウム2019講演予稿集, pp.334-335, 第52回安全工学研究発表会講演予稿集, pp.199-202, 第53回安全工学研究発表会講演予稿集, pp.141-144, 第54回安全工学研究発表会講演予稿集, pp.75-78 および pp.239-242 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

\*2 芝浦工業大学 工学部 機械機能工学科

知ることが重要であるため、取り扱う可燃物の熱分解ガス組成の経時変化や、燃焼条件より低い温度での熱分解ガス発生特性を把握しておくことが重要となる。

また、発生した分解ガスは一様に拡散するとは限らないため、有効な早期検出のためには、発生ガス、設備形状、充填状況に適切な位置にガスセンサを設置する必要がある。ガスセンサの適切な設置位置に影響を与える要因は、発生ガス、設備形状、充填状況など多岐に渡るため、予測無しに実験的にこれを決定しようとする、極めて多くの実験が必要となり、非現実的である。そこで、この予測を、数値シミュレーションにより行うことができれば有用である。近年、錦ら<sup>14)</sup>は、火災現象のシミュレータである National Institute of Standards and Technology (米国標準技術研究所) の Fire Dynamics Simulator (FDS)<sup>15)</sup>を用いて、トンネル火災事故の検証や漏洩水素の拡散シミュレーションを行っている。FDSは、燃焼を含まないガスの流動やガス拡散のシミュレーションも可能であるため、分解ガス検知のためのガスセンサ位置の決定についても活用できることが期待される。

本研究では、貯蔵設備における可燃性物質の爆発・火災の迅速な兆候検知を目的として、実験的にガスセンサの検知能力の評価を試みた。また、FDSを利用して、可燃物貯蔵設備内における熱分解ガス拡散シミュレーションを行い、ガスセンサの設置位置の評価に利用可能か検討した。

## 2. 実験条件および数値シミュレーション条件

### 1) ガスセンサの評価計測

本研究で使用した有機物試料を表1に示す。文献<sup>13)</sup>に記載された熱分解ガスの代表的な組成を時間分解分析の対象ガスとした。試料は一般の貯蔵設備での保存状態を想定して乾燥処理はせず、室温で1ヶ月以上保管したものを使用した。

最初に加熱条件を決定するため天然素材1種(ペイツガ)および合成プラスチック1種(ポリメタクリル酸メチル, PMMA)について、TG-DTA(熱重量-示差熱同時分析)装置(島津製作所, DTG-60H)による熱分解特性計測を行った。TG-DTAとは、TGA(熱重量分析)による加熱にともなう酸化(重量増)やガス化(重量減)の分析と、DTA(示差熱分析)による加熱にともなう化学反応や相変化による発熱・吸熱の分析を同時に行う分析法である。両者を比較することで、加熱による変化の原因を推定することが可能となる。ペイツガはヤスリによる切削で得た粉体、PMMAは凍結粉砕により得た粉体をアルミナセルに入れて計測する。空気を50 mL/minで流通させ、昇温速度10 K/minで室温から500℃まで昇温した。また、流通させるガスを窒素にして空気中のO<sub>2</sub>による酸化の影響も確認する。

図1に、熱分解ガス分析実験装置の概略を示す。装置は、40 mm×40 mmの矩形断面をもつ長さ500 mmの一次元流路中央に試料加熱用ユニットを設置したもので

ある。試料加熱用ユニットには断熱材(グラスウール)とマイクロセラミックヒータ(坂口電熱, MC1010, 定格40 V・40 W)を固定し、変圧器で50 V以下の電圧を印加する。MC1010は高速応答タイプのヒータで、電圧印加開始から1分以内に印加電圧に応じた温度に加熱される。試料はアルミ箔(厚さ11 μm)製のカップ内に入れてヒータ上で加熱する(図2)。流路上流側より純空気(CO, CO<sub>2</sub>, THC < 1 ppm)を流した状態で試料の加熱を開始する。純空気の流量は十分な時間分解能を得るために3 L/min(流路内ガスの換気回数3.8回/minに相当、発生した熱分解ガスは250 mmを約10秒かけてセンサ部に導入される)とした。加熱面温度上昇はヒータへの印加電圧により制御され、シース型K熱電対(径1.0 mm)

表1 有機物試料

試料名	形状	サイズ, mm	個数・全質量, g
PMMA (旭化成製, デルベット, GRADE 60N)		顆粒 直径 3	3 粒 0.07
低密度 ポリエチレン (旭化成製, サンテック-LD)		顆粒 直径 4	6 粒 0.10
高密度 ポリエチレン (旭化成製, サンテック-HD)		顆粒 直径 4	6 粒 0.10
ペイツガ		板状 厚 3, 1 辺 10	1 片 0.10
大豆 (日清オイリオ製, 特撰)		8 分割 した物	8 片 0.11
小豆 (丸勝製, 十勝産)		4 分割 した物	4 片 0.15

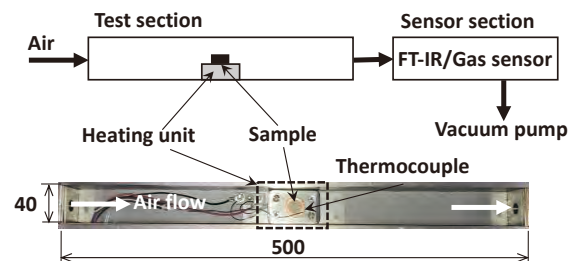


図1 実験装置の概略

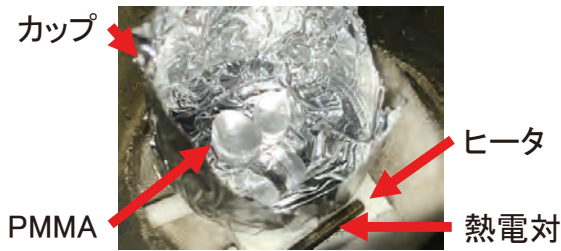


図2 アルミ箔（厚さ 11 μm）製カップ内の試料（PMMA）およびヒータ，熱電対

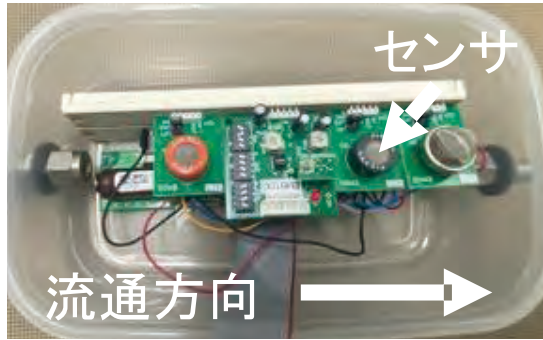


図3 センサボックス

とデータロガー（HIOKI, LR8432）によりモニタされる。

発生ガス成分の時間分解分析を行うため，加熱ユニットで発生したガスを FT-IR ガス分析装置（MIDAC Corporation, IGA-4000N）に導き，赤外線吸収スペクトル（時間間隔：約 50 秒）を得た．分析対象ガスの標準スペクトルとの比較により，発生ガスの同定を行い，各組成の時間変化を計測した。

続いて，本研究で用いた全ての試料について，ガスセンサの検知能力評価を行った．センサボックスは複数のガスセンサユニット（フィガロ技研）を容積 800 mL の密閉容器内に取り付けたものである（図 3）．センサボックスを FT-IR ガス分析装置の代わりに加熱ユニットの下流に配置し，熱分解ガス成分の検知を試みた．各センサからの電圧信号は，温度と同時にデータロガーにより記録される．用いたガスセンサの仕様を表 2 にまとめて示す．なお，空気の汚れセンサは近年，空気清浄機などが

主な用途であるセンサで，多くの化学種に感度があるため，ガス種の特定には不向きであるが，安価で高感度なセンサが入手しやすいという特徴がある．本研究で用いた空気の汚れセンサは水素，エタノールに高感度で，イソブタンにも感度がある一方，メタンにはほとんど反応しない。

なお，標準ガスを用いた確認実験では応答時間は 10 秒以内であった．温度センサとガスセンサの時間遅れは，熱分解ガスの発生からセンサまでの到達時間を含め，最大 20 秒程度が想定される．また，加熱開始 1 分程度は急速にヒータ温度が変化する．加えて，試料内の温度勾配も予想される．このような実験装置上の制約から，本研究では分単位未満の時間応答について議論することは難しい。

加熱時間は全実験条件で最大 20 分間とし，20 分以内にガスセンサの最大値に到達した場合には，最大値が計測されてから 1 分以上計測後に実験を中断した。

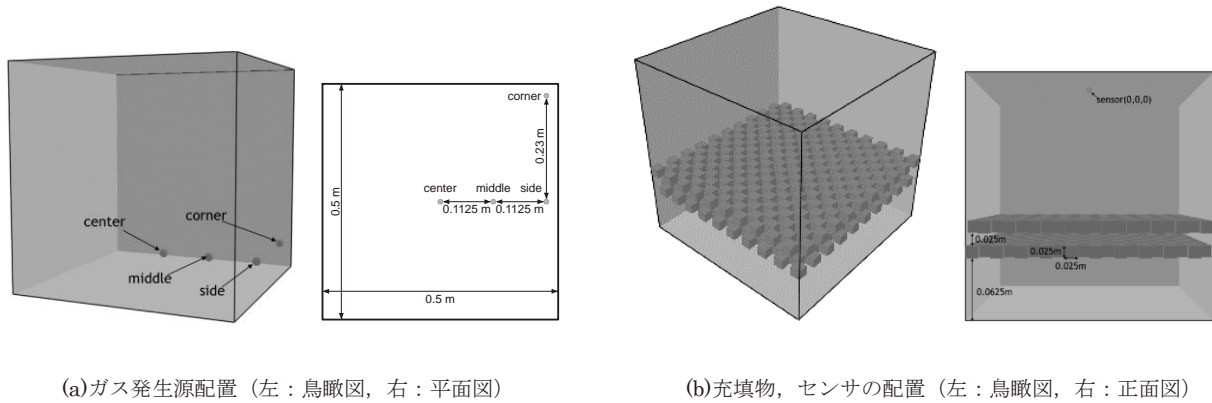
また，予備実験でベイツガについて同じ条件で 3 回計測を行ったが計測器の精度の範囲内で良い再現性が見られたため，各実験条件での計測回数は 1 回とした。

## 2) FDS によるガスセンサ位置の検討

FDS には，多くのインプットファイルが用意されており，個別のケースに合わせて，カスタマイズすることができる．本研究では，燃焼ガスの流動をシミュレートする「box\_burn\_away1.fds」をもとに，充填物などを追加した．計算モデルの概要は以下の通りである．計算時間を節約するため，立方体密閉空間を各辺 100 メッシュで分割した．また，境界条件は温度一定（30 °C）とし，境界面からのガスの出入りは無い物とした．発生したガスが流出する境界が無い場合圧力上昇が発生するが，無視できる量であった．この分割数で 0.025 m の粒を設定可能な最大の大きさである 0.5 m を計算領域の一边とした．下面から 0.0625 m の高さにガス発生源をおき，上面中央にガスセンサ（ガス濃度計測点）を設置し，センサ設置位置でのガス濃度を計測した．実際の事故では，ガス発生開始位置は様々であるため，ガス発生源は下面中央付近と下面角付近を含めた 4 条件を考慮した．その位置を図 4 に示す．ガス発生源は半径 0.01 m の球体と

表 2 ガスセンサの仕様

検知ガス	検知方式	ガスセンサ型式	濃度範囲 (ppm)	出力特性 (V)
空気の汚れ (水素, アルコール)	半導体式	TGS8100	1 - 30 (水素)	0 - 3.0
メタン, プロパン, ブタン	半導体式	TGS813	500 - 10,000	0 - 5.00
水素	半導体式	TGS821	100 - 2,000	0 - 5.00
アルコール, 有機溶剤	半導体式	TGS822	50 - 5,000	0 - 5.00
一酸化炭素	電気化学式	CMM5042	0 - 800	2.0 - 0.0 (負出力)



(a)ガス発生源配置 (左:鳥瞰図, 右:平面図)

(b)充填物, センサの配置 (左:鳥瞰図, 右:正面図)

図4 計算領域の概要

し、点吹き出しとした。ガス発生速度は FT-IR の実験結果から得られたガス濃度から質量流速を計算した結果、30 °C (環境温度と同じ)のメタンが質量流束 0.001 kg・m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> の速度で発生するものとした。充填物は、一辺 0.025 m の立方体を市松模様状に並べたものを一層として図 4 のように二層配置した。その際、各層の開口部が互い違いになるようにした。ガスセンサの評価計測で用いたメタン等のセンサの最小検知濃度が 500 ppm であることを考慮して、センサ設置位置へのガスの到達時間は、ガス発生開始からセンサ設置位置におけるメタン濃度が 500 ppm に達するまでの時間とした。

以上の通り、FDS は充填物やガス発生位置、センサ設置位置などを任意に設定可能であり、実際の設備形状や充填状態に即したガス拡散のシミュレーションが可能である。

### 3. 実験結果および考察

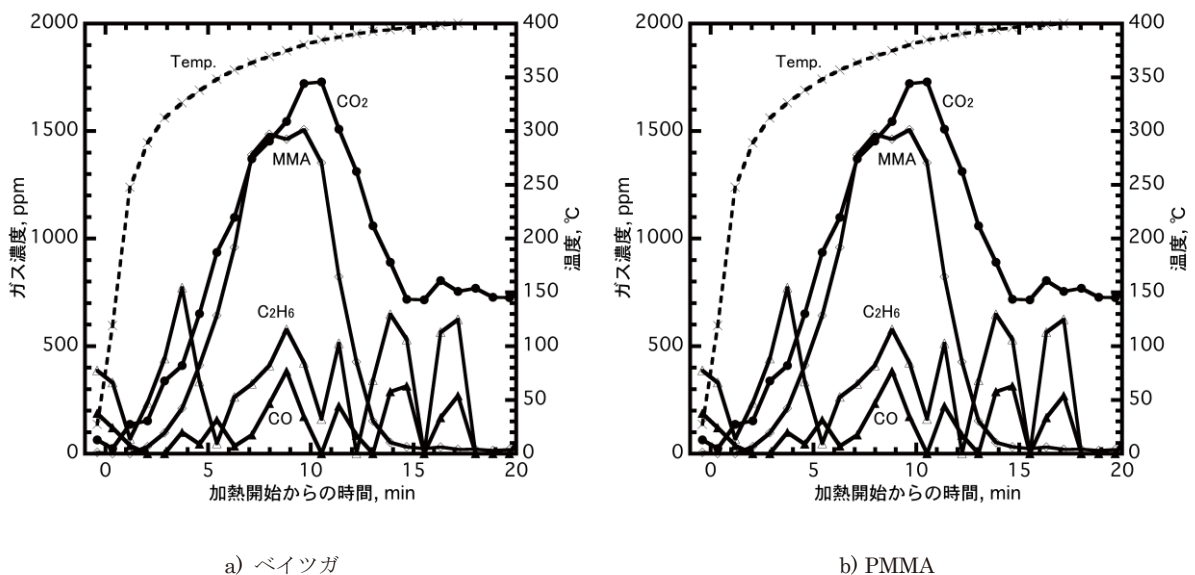
#### 1) TG-DTA 計測

空気雰囲気下で計測したベイツガの熱分解開始温度

$T_0$  は 272 °C、PMMA の  $T_0$  は 287 °C であった。ベイツガでは水分の蒸発に起因すると考えられる重量減少が 100 °C 付近で観測された。また、窒素雰囲気下で計測した結果は空気雰囲気下の結果とほぼ変わらず、 $T_0$  はベイツガが 278 °C、PMMA が 301 °C であった。窒素雰囲気下の計測結果との比較から、ベイツガ、PMMA 共に重量減少の主要因が酸化分解ではなく熱分解ガスの発生によることが確認された。ただし、熱分解ガスが発生後、空気雰囲気中で酸化される可能性は残った。

#### 2) FT-IR ガス分析

図 5 にベイツガと PMMA の熱分解ガス濃度の時間分解分析の結果を試料温度と共に示す。最終試料加熱温度は、TG-DTA の結果から熱分解ガスの全ての成分が生成されると期待される 400 °C とした。加熱を室温である約 25 °C から開始した結果、3 分で 300 °C、10 分で 370 °C まで到達した。映像で確認したところ、ベイツガのみでくん焼が見られ、炭化が進んだ。今回の実験条件では文献<sup>13)</sup>から予測された熱分解ガスの組成の内、ベイツガのアセトアルデヒド、エチレン、アセチレン、アクロレイ



a) ベイツガ

b) PMMA

図5 ベイツガおよび PMMA の熱分解ガスの経時変化

ン、プロピレン、エタン、プロパン、PMMA のプロピレン、メタン、アセチレン、エタンについては、定量分析出来る濃度は検出できなかった。これは、(1)時間分解能を優先したために濃度が低くなる、(2)FT-IR ガス分析装置まで流動する間に酸化が進み二酸化炭素などに化するなどの理由によると考えられる。

また、メタンやエタンの発生も確認されたが、定量的な議論をするためには FT-IR ガス分析は感度が不十分だった。FT-IR ガス分析は分子内に 2 重結合や 3 重結合などを含む分子は高感度で計測可能である一方、単結合しか含まない分子の感度は低くなる。メタンおよびエタンの分子構造には単結合しか含まれないため、低感度の測定結果となった。これらの化学種や 100 ppm 以下のより定量的な議論をするためには FT-IR ガス分析の S/N の向上など（ガス流量を減らしたり積算回数を増やしたりするなど）の改良が必要である。

各試料から生成する熱分解ガスの時系列変化に注目すると、ベイツガ（図 5a）は熱分解開始温度  $T_0$  から二酸化炭素が発生し始め、加熱から 8 分後、370 °C で最高ガス濃度を示した。一酸化炭素は二酸化炭素より 5 分遅れ、330 °C から発生し始め、概ね二酸化炭素と同時刻に最高ガス濃度を示した。メタンの発生は、くん焼初期の段階での発生は少なかった。PMMA（図 5b）も  $T_0$  から二酸化炭素が発生し始め、加熱から 10 分後、380 °C で最高ガス濃度を示した。一酸化炭素はベイツガより少なかったが二酸化炭素に追従する傾向は同じであった。また PMMA では二酸化炭素と同時刻にモノマーである MMA（メタクリル酸メチル）が発生し、MMA については二酸化炭素と同程度発生するという文献<sup>13)</sup>と一致した。またエタンの発生も確認された。

### 3) ガスセンサ計測

図 6 に一例として低密度ポリエチレンの計測結果を示す。ガスセンサの出力は試料温度と共に時系列変化として計測される。センサによって感度が異なり、同じ検出電圧でも同じガス濃度を意味しないが、ガスセンサによる検知しやすさを評価するため、あえて電圧から濃度への変換は行わなかった。すなわち、ガスを検知すると空気の汚れセンサ(TGS8100)の電圧は上がり、一酸化炭素センサ(CMM5042)の電圧は下がる。図 6 では 0.5 分付近から空気の汚れセンサの出力が検出されており、4 分付近から検出電圧がさらに高くなっている。本研究の主

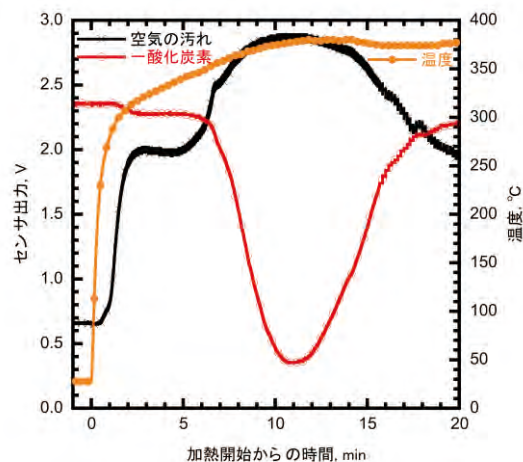


図 6 低密度ポリエチレンの熱分解ガスのガスセンサ出力時系列変化(設定最終温度 400 °C)

旨から離れるため、詳細には分析しなかったが、0.5 分付近で始まるガス発生は、低重合成分と副鎖の反応に起因し、4 分付近で始まるガス発生は主鎖に起因すると予想される。

ノイズによる信号約 20 mV を考慮して 30 mV 以上のセンサ出力が得られた温度を検出開始温度と定義して、設定最終温度を変えて (180, 250, 300, 400 °C) 最も低い温度を示したデータをその試料の検出開始温度とした。全ての試料について同様に実験を行いデータ処理した結果を表 3 に示す。

表 3 から、今回計測した試料は全て空気の汚れセンサによる計測が最も低い温度 (110~200 °C) から検出可能であることが分かる。空気の汚れセンサの特性から、一酸化炭素もしくは FT-IR ガス分析で計測が難しかったアセトンなどのケトン類などを高感度に捉えた結果と考えられる。メタン等センサ(TGS813)および水素センサ(TGS821)は 230 °C 以上で明確なガス検出が見られるが、その信号強度は他のセンサと比べ小さく、今回計測した試料に限っては熱分解ガスの検出に不向きであることが明らかになった。試料ごとの特徴を比較すると、プラスチック (PMMA および 2 種類のポリエチレン) では空気の汚れセンサでも 170 °C 付近までガスを検出できないこと、240 °C 付近からくん焼によると見られる化学種に依存した熱分解ガスが検出されることが挙げられる。同じポリエチレンでも低密度と高密度では、低重合成分

表 3 ガスセンサ検出開始温度 (単位 °C)

ガスセンサ 検知ガス	PMMA	低密度 PE	高密度 PE	ベイツガ	大豆	小豆
空気の汚れ	199	170	227	113	120	129
メタン等	285	279	311	248	230	301
水素	350	358	354	263	260	313
有機溶剤等	252	303	296	289	238	214
一酸化炭素	336	339	314	305	257	233

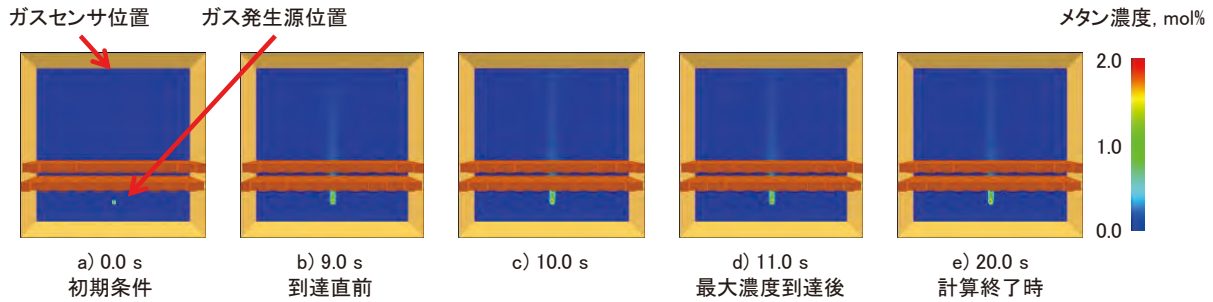


図7 メタン濃度分布の経時変化  
(充填物あり, ガス発生位置 center)

比や固体内ガス拡散が異なるためか、低温(170~230℃付近)で異なる挙動を示す。また、天然の有機物(ベイツガ, 大豆, 小豆)では空気の流れセンサーにより120℃付近でガスが検出される。このことは天然素材の含水率がプラスチックと比べ高いことにより水分蒸発と蒸発に伴う微量成分の気化が促進されるためと推定した。また、有機溶剤等センサー(TGS822)や一酸化炭素センサー(CMM5042)も230℃付近からガスを検出し、熱分解ガス中の高揮発成分や一酸化炭素の存在を示唆した。

#### 4. 数値シミュレーション結果および考察

4種類のガス発生位置に対して、充填物の有無を変えて8条件のシミュレーションを行った。一例として、充填物ありの条件でガス発生位置が center の場合のメタン濃度分布の経時変化を図7に示す。図7では、ガスセンサー位置とガス発生位置を含む断面の濃度分布を示した。観測されたメタン濃度は、ガス拡散状況に応じた時間遅れの後、ガスセンサー位置に到達し、その後、一定の濃度となった。図7から、センサー位置にメタンガスが到達した後は、ガス発生位置近傍からガスセンサーの近傍では、メタンガスの拡散が等方的な分子拡散より、対流の効果が支配的であるため、準安定状態だったと推定できる。図8にセンサー位置でのメタン濃度の経時変化を充填物なしの条件と併せて示す。メタンガスがセンサー位置に到達してから、概ね1~2秒の間に最大濃度付近まで上昇した。その後、濃度分布の経時変化で見られた通り、ほぼ一定の濃度となった。今回設定した全てのガス発生位置条件で、同様の濃度上昇の傾向が見られ、20秒後のメタン濃度について比較すると、センサーとの距離が最も短い center の場合が最大となった。次に近い middle の場合

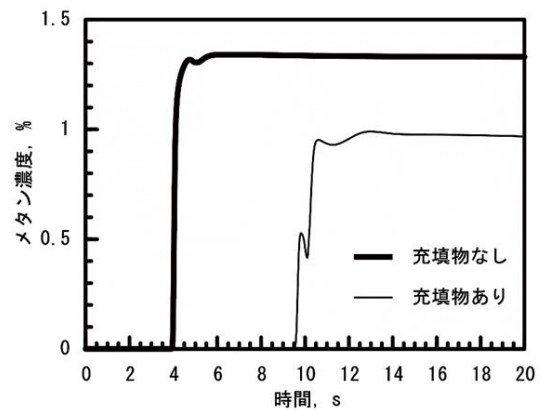


図8 センサ位置で観測されるメタン濃度の経時変化  
(ガス発生位置 center)

が center に続く結果となったが、side と corner の場合はガス発生源とセンサーの距離だけでは説明できなかった。メタン濃度の上昇が緩やかになる時点での上面付近のメタン濃度分布は、どのガス発生源位置でもガス発生源位置直上を中心とした円状に分布していることがシミュレーション結果から確認できた。side と corner の場合には側面の影響によりセンサー方向にしかメタンが拡散せず、側面がない条件と比べセンサー方向のメタン濃度が上昇するため、ガス発生源とセンサーの距離のみには依存しない結果となったと考えられる。

ガス到達時間を求めた結果を表4に示す。充填物のあり・なしにかかわらず、センサー直下にガス発生源がある条件 center が最も到達時間が短くなった。充填物が無い場合、最も到達時間が短い center の場合(3.97 s)と比較して最も長い side の場合(13.30 s)は約3倍長くなった。一方、充填物がある場合、最も到達時間が短い center の

表4 センサへのガス到達時間

ガス発生源位置	到達時間, s		center 条件との到達時間比	
	充填物なし	充填物あり	充填物なし	充填物あり
center	3.97	9.62	1.00	2.42
middle	5.95	12.30	1.50	3.12
side	13.30	15.67	3.35	3.94
corner	12.19	16.90	3.07	4.25

場合(9.62 s)と比較して最も長いcornerの場合(16.90 s)は約1.8倍長くなった。このことは、充填物によって水平方向のガス拡散が促進されるため、ガス発生位置の影響が小さくなったためと考えられる。充填物が3層以上になった場合、ガス発生位置の影響が小さくなるという傾向がより顕著になるか否かについては、さらに充填物層を追加したシミュレーションが必要である。

なお、メッシュ数の影響を確認するため、充填物あり、ガス発生源下面中央の条件でメッシュ数を各辺200でもシミュレーションを行ったが、ガス分布形状に大きな差は無く、到達時間もほぼ同じであった。

## 5. まとめ

本研究では、貯蔵設備における可燃性物質の爆発・火災の兆候検知を目的とした熱分解ガスの検知について、実験的にガスセンサ選択および検知能力を評価する方法およびシミュレーションによりガスセンサの設置位置を評価する方法を示した。

今回使用した試料とセンサの組み合わせでは、全ての試料において、より低温で兆候を検知するためには空気の汚れセンサが最も有効であった。可燃性物質が合成樹脂の場合、一酸化炭素センサなどの酸化反応の生成物を検知するセンサより低温で兆候を検知できるセンサ(空気の汚れセンサ)があることが分かった。空気の汚れセンサが外乱の影響を受けやすいことを考慮すると、早期検知のために空気の汚れセンサで検知を行い、誤検知の抑止のためにメタン用や有機溶剤用等のセンサを併用することがガスセンサの良い組み合わせであることを示した。

火災シミュレータであるFDSを用いて充填物やガス発生位置とセンサ設置位置の関係がガス到達時間に与える影響の一例を示し、FDSがガスセンサの最適位置の検討に有用であることを示した。

本研究では最適なガスセンサの選定およびガスセンサの設置位置の決定に有効な手段を示した。また、本報で示した手法により貯蔵設備における可燃性物質の爆発・火災の兆候検知能力の評価が可能となることから、トラブル対処作業の検討に資することが期待される。

## 謝 辞

本研究で使用した試料の提供およびTG-DTA計測において多大なるご協力を頂きました。労働安全衛生総合研究所 化学安全研究グループ 八島正明氏に心より感謝申し上げます。また、FDSの計算においてご協力頂きました、芝浦工業大学 工学部 機械機能工学科 加藤雅也氏に感謝申し上げます。

## 参 考 文 献

1) 化学設備の非正常作業における安全 - 「化学設備の非定

常作業における安全衛生対策のためのガイドライン」の見直しに関する調査研究報告書 - 中央労働災害防止協会。平成27年3月。2015。

- 2) 労働省安全衛生部安全課編。化学設備の非正常作業の安全ガイドラインと解説。中央労働災害防止協会。1998; 52-67。
- 3) 労働安全衛生総合研究所。災害調査報告書。https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/saigai\_houkoku.html より、(a)2014-02 生ごみ処理施設、(b)2015-06 タンク覗き窓、(c)2015-07 濃硫酸タンク補修、(d)2016-06 酸素アーク溶断、(e)2017-04 銅合金製造工場、(f)2017-05 廃油リサイクル工場、(g)2017-06 清掃工場、(h)2018-01 フッ化水素(最終アクセス日 2019年2月28日)
- 4) コマツキャストテックス株式会社アーク式電気炉事故調査委員会。最終調査報告書。https://www.komatsu.co.jp/CompanyInfo/press/pdf/kcx\_report\_final-a.pdf (最終アクセス日 2019年2月28日)
- 5) 株式会社日本触媒事故調査委員会。株式会社日本触媒姫路製造所アクリル酸製造施設爆発火災事故調査報告書。https://www.shokubai.co.jp/ja/news/file.cgi?file=file1\_0111.pdf (最終アクセス日 2019年2月28日)
- 6) 三井化学株式会社岩国大竹工場レゾルシン製造施設事故調査委員会。三井化学株式会社岩国大竹工場レゾルシン製造施設事故調査委員会報告書。https://www.mitsuichem.com/jp/release/2013/pdf/130123\_02.pdf (最終アクセス日 2019年2月28日)
- 7) 新日鐵住金株式会社コークス事故対策委員会。新日鐵住金株式会社名古屋製鐵所コークス火災事故調査報告書。https://www.nssmc.com/common/secure/news/20150407\_100\_03.pdf (最終アクセス日 2019年2月28日)
- 8) 大江破碎工場火災事故に伴う不燃ごみ処理のあり方検討委員会。大江破碎工場火災事故に伴う不燃ごみ処理のあり方について(報告)。https://www.city.nagoya.jp/kankyo/cmsfiles/contents/0000077/77132/houkokusyo.pdf(最終アクセス日 2019年2月28日)
- 9) 広島市環境局。中工場2系灰溶融火災事故調査報告書。http://www.city.hiroshima.lg.jp/www/contents/1319775725165/simple/common/other/4eb0e63c003.pdf (最終アクセス日 2019年2月28日)
- 10) 東ソー株式会社 南陽事業所 第二塩化ビニルモノマー製造施設 爆発火災事故調査対策委員会。南陽事業所第二塩化ビニルモノマー製造施設爆発火災事故調査対策委員会報告書。https://www.tosoh.co.jp/news/assets/20120613001.pdf (最終アクセス日 2019年2月28日)
- 11) 網干健康増進センター事故に係る調査・安全対策検討委員会。網干健康増進センター事故に係る調査報告書。https://www.city.himeji.lg.jp/var/rev0/0110/1626/20171123125743.pdf (最終アクセス日 2019年2月28日)
- 12) ごみ固化燃料(RDF)の爆発・火災の危険性と 安全な取扱いについて NIIS - SG - NO.3, 2004.
- 13) 日本火災学会編, 火災便覧 4 版, 共立出版, pp.840-861, 2

018.

14) 錦慎之助, FDS による火災・安全シミュレーション, JSM  
E TED Newsletter, No.71, pp.15-19(2013).

15) National Institute of Standards and Technology (NIST). FD  
S-SMV.

<https://pages.nist.gov/fds-smv/> (最終アクセス日 2022 年 6 月  
3 日)