

# プラント保全のスマート化を実現する ガス監視システムの開発

Optical Gas Imaging (OGI) Gas Leak Monitoring System for Plant Safety

森本 隆史\*  
Takashi MORIMOTO

浅野 基広\*  
Motohiro ASANO

都築 斉一\*  
Seiichi TSUZUKI

鈴木 昭洋\*  
Akihiro SUZUKI

## 要旨

国内外の石油・化学プラントの多くが老朽化と熟練作業員の減少という深刻な課題を抱えており、保全力の低下から可燃性ガス漏洩等による大型事故発生の懸念が高まっている。現状のガス漏洩検知手段では、警報発報時の漏洩元特定が容易でなく、事故大型化のリスクがある。

このリスクの最小化を目指して、我々は、可燃性ガス漏洩を遠隔から常時監視するシステムを開発した。このシステムでは可燃性ガスの空間的な広がりを映像としてとらえ、画像処理を施すことでガス漏洩位置と濃度の推定を行い、作業者がガスの存在を分かりやすいように可視画像の上に重畳表示する。このようにして早期発見・早期対応を可能にすることで事故大型化のリスクを最小化する。

我々のシステムでは、赤外線カメラを用いて、ガスの存在を赤外線映像における信号変化としてとらえる。映像には他のさまざまな要因（物体の動き、太陽光の変化等）による信号変化が同時に生じるため、ガスの存在を知るには信号の分別認識が必要である。我々はこの分別認識を実現する画像処理アルゴリズムを開発し、人の目に頼らずとも自動的にガスの存在を検知する方法を構築した。

上記画像処理アルゴリズムを搭載したカメラをネットワーク接続により複数連携して広大なプラントを集中監視するシステムを開発した。監視エリアでガス漏洩が発生した場合、アラーム発報とともにモニター上にガス漏洩の状況を映像で表示することで、現場の状況把握を助け効率的な保全作業の実現につなげる。この取り組みは経済産業省が推進する産業保安のスマート化構想と一致しており、現在その先のIoTビジネスを見据えた開発を進めている。

## Abstract

Many petroleum and chemical plants in Japan and overseas today face the problems of aging facilities and a lack of skilled workers, increasing the difficulty of conducting proper maintenance. This has raised concerns about the occurrence of large-scale accidents due to the leakage of flammable gas.

In response, we developed an optical gas imaging (OGI) system using integrated visible and infrared (IR) light camera units to remotely and constantly monitor the leakage of flammable gas. The system connects up to eight IR camera units in a network that can constantly monitor the exterior of a large plant. When gas leaks occur in the monitored area, an alarm is displayed on the system's monitor along with an IR image of the gas leak superimposed on a corresponding visible image of the same area.

By displaying the concentration length product, it is possible to easily recognize the scale of the gas leak. In our system, gas diffusion can be detected with an IR camera as infrared signal change. However, changes in an infrared signal due to gas are often smaller than the movement of solid objects in the image area, changes in sunlight conditions, and other local physical distractions. To identify the presence of gas, we developed an image processing algorithm with two important features.

First, because gas shows a characteristic temporal change as it drifts with air movement, it can be distinguished from changes in sunlight conditions. Second, because a change in the concentration length product of gas is a spatially gradual change, gas can be distinguished from the movement of solid objects.

We conducted an evaluation of gas detection performance in detecting a methane gas leak on a rainy day. This was a challenge because of the slightness of the difference between the background temperature and the temperature of the air. While it was raining, the area in which gas could be detected decreased. But when the rain stopped, that area rapidly returned to original size. This confirmed the practicality of the gas detection system.

## 1 はじめに

豊かで健康的な生活は、様々な化学製品やエネルギーインフラによって支えられている。これらは石油・化学・電力・ガスなどのプラントにより供給されているが、国内外のプラントの約半数は建設後40年超という期間が経過し、老朽化が深刻になっている。更に、これらのメンテナンスを担う運転員も高齢化の進行に伴い、高い技術力を持ったベテランが一斉に退職、プラント保全力が低下し、ガス漏洩爆発事故等の重大な事故が発生するリスクが高まっている。現状のガス漏洩検知システムでは、警報発報後の漏洩元の特定を人の五感と経験に頼っており、事故処理の早期対応が困難で事故の大型化を招くリスクをはらんでいる。

我々は、上記課題を解決すべく、赤外線によるガスの可視化技術に注目した。この技術ではガスを映像としてとらえることで、漏洩元を容易に特定することができる。この技術を用いて可燃性ガスを遠隔から常時監視するシステムの開発を行った。

## 2 ガス可視化原理

本ガス監視システムは、赤外線カメラを用いてガスの存在を映像としてとらえる。そこでまず赤外線によるガスの可視化原理について説明する。

あらゆる物体からは黒体放射現象に基づいて電磁波が放射されている。物体温度が常温近辺であれば放射スペクトラムは主に赤外線領域となるため、赤外線カメラで空間を観察すると、空間全体が赤外線光源として見える。赤外線強度は温度に依存するため、赤外線強度から温度への変換が可能であり、赤外線カメラの一種であるサーモグラフィカメラはこの原理を使って空間内の温度を観測している。実際には周辺からの照明（特に太陽による照明）があったり、観測対象が赤外線を放射する能力（放射率）が低かったりすると強度と温度の関係がずれてくるので、観測される温度は赤外線強度を単純に温度に変換した値ということで見かけ温度と呼ばれる。

一方、ガスは分子の原子間結合に基づいた電磁波の吸収スペクトラム並びに温度に依存した放射スペクトラムを持っており、特に我々が監視対象としている可燃性炭化水素系ガスの多くのスペクトラムが赤外線領域となる。このため、赤外線カメラでガスが存在する領域を観察すると、Fig. 1 に示すようにカメラから見てガスの向こう側の空間（背景）から来た赤外線の一部がガスに吸収されて強度が弱まるとともに、ガス自身が赤外線を放射するために、赤外線の強度が、ガスが存在しない領域と比べて変化する。すなわち観測される温度が変化する。この変化をとらえることでガスを可視化する。

観測される温度の変化の仕方は、背景温度（見かけ温度）とガス温度の大小関係によって決まる。背景温度が高くガス温度が低い場合は、低い方に温度変化する。背

景温度が低く、ガス温度が高い場合は逆となる。すなわち背景温度は、ガス温度に近づく方向に変化する。もし温度が同一であれば、温度変化がなくなりガス可視化ができない事になるのでガス濃度と背景温度が異なっていることがガス可視化の条件となる。

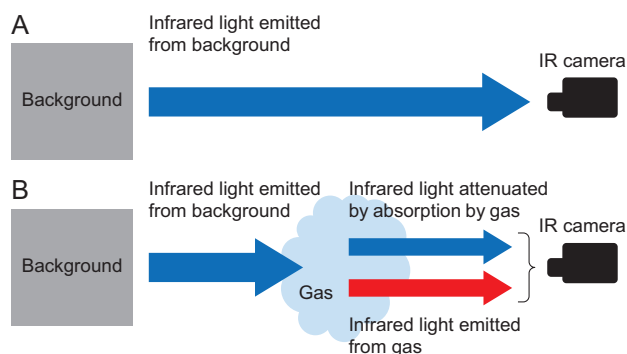


Fig. 1 Visualization of gas using an infrared camera.

A: When no gas is present between the infrared camera and the background, the infrared light provided by the background's black-body radiation reaches the infrared camera without interference. B: When gas is present, the gas absorbs a portion of the infrared light provided by the background's black-body radiation. In addition, the gas itself emits infrared light, and these emissions reach the infrared camera mingled.

As long as there is a difference in temperature between the background and the gas, the presence of the gas can be detected even if the gas temperature equalizes with the ambient air temperature because the light absorption characteristics of gas and air are different.

## 3 ガス検知画像処理

### 3.1 画像処理上の技術課題

屋外でガスによる画像上の温度変化を捉えようとする時、ガスとは異なる2つの温度変化が大きな課題となる。1つは雲の動きなどによる画像全体の温度変化である。Fig. 2B,Cの画像は時間差6秒の画像であるが、6秒後の画像(C)は全体的に温度が低い方に変化している。もう1つはFig. 2C赤枠部のような人や車などガス以外の動体の映り込みである。なお、Fig. 2Cはガス漏洩した時の図であり、緑枠で囲われた部分にガスが存在しているのだが、ガスによる温度変化は画像上からは識別が困難である。これは、ガスよりも先に述べた雲の動きや人・車などのガス以外の動体といった外乱要因による温度変化の方が大きいためであり、背景差分のような一般的な画像処理を適応することはできないことが分かる。広大なプラントをカバーするために遠隔から撮影すると、赤外線領域に吸収スペクトラムを持つ大気中の水蒸気の影響を受けやすくなるため、この傾向は顕著となる。

ガスの濃度推定についても、大きな課題が存在する。濃度推定は原理的に、ガスが存在しない場合と存在する場合の2種類の背景温度が必要となるが、カメラからはガスの存在の有無の分からない1つの温度データしか得られない。

なお、カメラのような光学的手段で観測する物理量はガスによる吸光度であるが、吸光度はガス濃度とガスの厚みを乗算した値の関数となるため、カメラで推定可能な濃度は、実際には濃度と厚みの乗算値（濃度厚み積）となる。

単位としては、100分率濃度と距離（m）の積である %m や 100万分率濃度と距離の積である ppmm があるが、可燃性ガスを対象とした場合、爆発下限界濃度（Lower Explosion Limit, LEL）と距離の積である LELm が用いられることが多い。例えばメタンガスであれば LEL は 5% であるので 100%LELm は 5%m と同義となる。

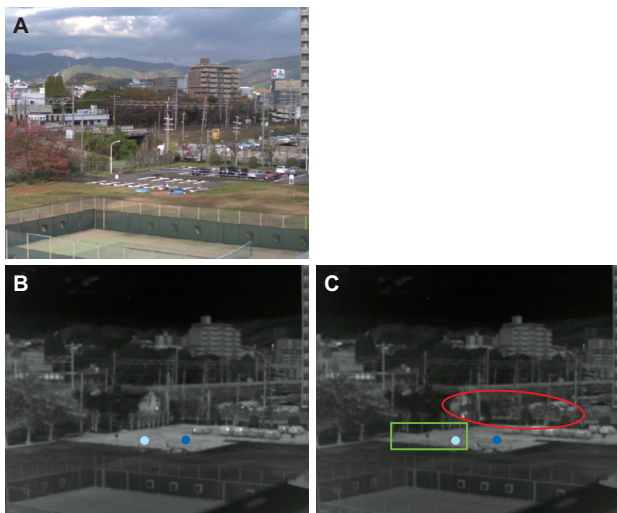


Fig. 2 The camera unit's visible and infrared camera images of leaking gas.  
 A – A visible image was captured by a standard camera mounted above the infrared camera.  
 B – An infrared image was captured by the infrared camera. In this image, no gas was leaking.  
 C – This infrared image was captured six seconds after image B, when gas was now leaking. The shade from clouds moving overhead have decreased the temperature of the background. In the green rectangle, the leaking gas is represented as a temperature change, although it is far smaller than the change of the background temperature caused by drifting clouds, making it difficult to identify the gas in the image. In the red ellipse, moving vehicles are also represented as a temperature change.

### 3.2 温度変化画像からのガス画像の抽出

Fig. 2C のガスが撮像されている画素（水色）と、ガスが撮像されていない画素（青色）の温度変化を Fig. 3 に示す。

撮像時の雲の移動による太陽照明変化によって、全体的に緩やかな温度変化が観測されているが、前者の画素では、さらに赤枠で示すような特徴的な温度変化が観測される。これは風によるガスの揺らぎにより生じた温度変化であり、全体的な変化よりも高い周波数を持つという特徴がある。風によるガスの揺らぎに相当する周波数のみを抽出することで、ガスの特徴を持つ信号成分を、Fig. 4 に示すように画像として可視化できる。

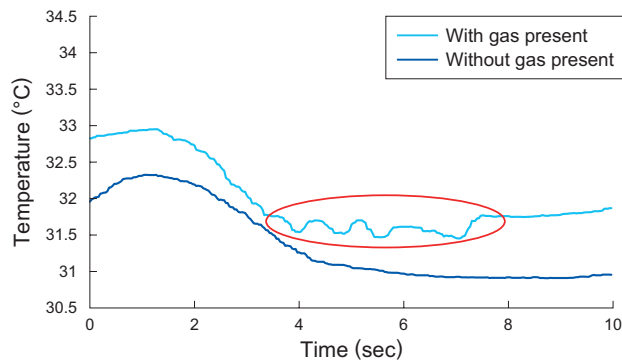


Fig. 3 Changes in detected pixel temperature with and without gas leakage.

Pixel temperatures change differently with (light blue line) and without (dark blue line) a gas leakage. Each pixel corresponds to the pixel of the same color in Fig. 2. Note the fluctuation from 4 to 6 seconds: this pattern is characteristic of temperature changes caused by fluctuations of air and is indicative of the presence of gas.



Fig. 4 Gas signal image.

As shown in Fig. 3, temperature changes that are characteristic of gas indicate its presence and are then visualized. In the lower left, leaking gas is visualized, while in the middle right, moving vehicles are also visualized, but will be excluded later.

### 3.3 濃度厚み積の推定と外乱動体の識別

風やガス自身の拡散現象によって、ガスの濃度は刻々と変化するため、ガス存在領域で観測される温度も刻々と変化する。つまり温度変化の振幅の上下はガスの濃度が最も濃いときあるいは薄いときのいずれかを表すこととなる。

ガスの可視化原理から、ガスが存在すると背景温度はガス温度に近づく方向に変化する。Fig. 5 はガスが撮像されている画素の温度変化を示しているが、撮影時の気温が画素の温度と比べて低かった (14.7°C) こと、ガスが大気中に拡散していくうちに温度が気温になじむためガス温度が気温で近似できること、を考慮すると Fig. 5 の振幅の上側包絡線（黒点線）が、ガスが存在しない場合の背景温度、下側包絡線（赤点線）が、ガスが存在する場合の背景温度と推測できる。

ガスが存在しない場合の背景温度、ガスが存在する場合の背景温度、ガス温度の情報があれば、ガス可視化原理を応用して濃度厚み積が算出できる。ガス漏洩している 6 秒後のデータに対して、濃度厚み積を算出し輝度として表した結果を Fig. 6 に示す。

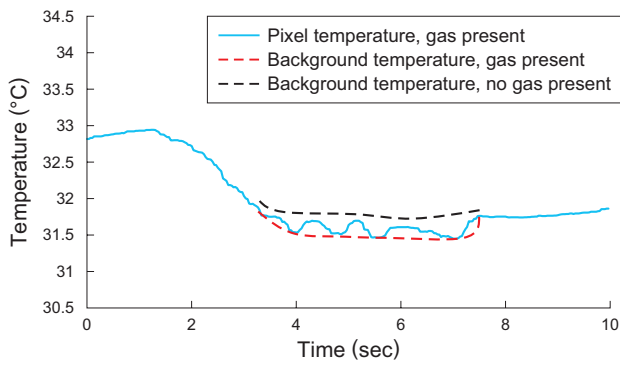


Fig. 5 Estimating gas concentration length.

The absorbance of gas measurable by optical means is the gas concentration length. By definition, the gas concentration length is the product of the concentration of the gas multiplied by the thickness of the gas. The concentration length can be calculated from three temperatures: gas temperature, background temperature without gas, and background temperature with gas. The gas concentration length is an indicator of the scale of a gas leak that is measurable by the camera, and it also allows people, vehicles, and other such solid, moving objects to be distinguished from gas leaks. The temperature change of pixels where the gas is present (light blue dot in Fig. 2) is shown here. As the gas diffuses into the atmosphere, the temperature approximates the atmospheric temperature. Because the measured air temperature here was lower than the background temperature, the black dotted line indicates background temperature in the absence of gas, and the red dotted line indicates background temperature in the presence of gas.



Fig. 6 Gas concentration length image.

The calculation of the concentration length image shown here is based on the method described in Fig. 5 with respect to Fig. 2. Because of the gas concentration's gradual spatial variation, the gas is distinguishable from other input as indicated by the distribution of the gas concentration length. Note that the green rectangle shows a smooth, spatial concentration length change corresponding to that of gas suspended in the air. The red ellipse shows a steep, spatial concentration length change caused by moving vehicles, so that it is obvious that this concentration length change was not created by leaking gas.

緑枠で囲われたガス漏洩部の輝度は、実際のガスが示す濃度変化と同様に、画像上で滑らかに変化しているが、赤枠で囲われた人や車などの外乱動体の輝度は画像上で滑らかなには変化しておらず、ガスではないと識別できる。

このようにしてガス領域を特定したのち、Fig. 7のように可視画像に重畳することで、ガスを分かりやすく表示できる。更に時間的に連続して作成することで、ユーザにはガスが流れる映像を提供することが可能となる。



Fig. 7 Gas superimposed image.

The infrared gas image is superimposed as a pseudo-color image over the visible image (Image A in Fig. 2). Thus, the gas leakage can be visually identified with ease.

### 3.4 ガス検知性評価

ガス検知性は原理的に、背景温度とガス温度の温度差が小さくなるほど低くなる。漏洩したガスの温度は気温となじみ、ほぼ同じ温度になる。晴れの昼間の場合、背景は太陽光の影響で見かけ温度が高くなるため、大きな温度差ができることが多く、一般的に検知性は高くなる。しかし、雨の場合には実際に高温の物体でない限り背景温度も気温に近づくため、検知性は低くなる。Fig. 8に、弊社環境で濃度厚み積10%LELmのメタンガスが漏洩した場合の雨の1日の検知性を評価した結果を示す。

2種類の図とも横軸は24時間の変化を示し、縦軸は上図が雨量、下図が検知可能エリアの割合を示す。雨が降ったタイミングでは検知可能エリアは少なくなるが、雨がやむと急速に回復するため、製品として活用可能なレベルにあるとの評価結果が得られた。

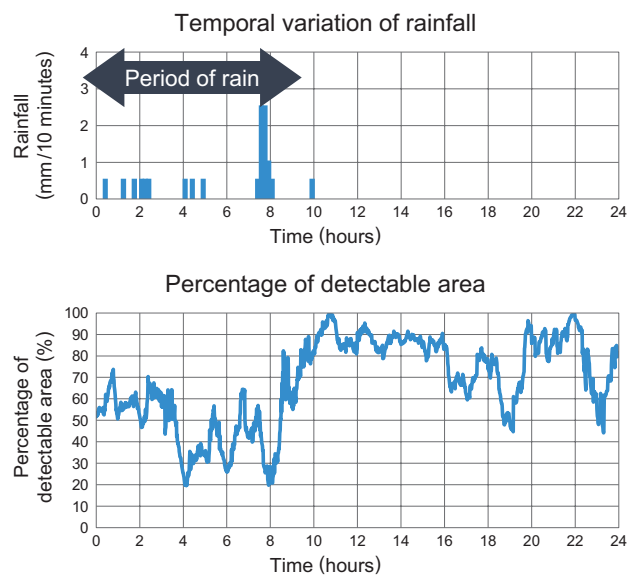


Fig. 8 A 24-hour field evaluation of the system's ability to detect gas.

We conducted this evaluation on a rainy day, a condition in which detection performance is low because of the slightness of the temperature difference between the background and the air. The percentage of the detectable area to the imaged area decreased while it was raining, but rapidly rebounded when the rain stopped.

## 4 保全スマート化の取り組み

上述したガス検知画像処理を搭載したカメラユニットをネットワークでつなぎ、広大なプラントを集中監視するシステムを開発した。今回開発した防爆仕様のカメラユニットをFig. 9に示す。



Fig. 9 The gas detection camera unit, consisting of a visible image camera and an IR camera mounted below it.  
The camera unit is sealed so as not to spark an explosion in the presence of gas.

本システムは最大8台のカメラユニットを接続することができ、広大なプラントの状態を常時監視することができる。監視エリアにおいてガス漏洩が発生した場合は、モニター上にアラームを発するとともに、ガス漏洩の状

況を可視画像にガス画像を合成した映像でわかりやすく表示する。またガス漏洩元や漏洩ガスの濃度厚み積の推定情報を出力する機能を開発、搭載した。これらの情報提供により現場の状況把握を助け、効率的な保全作業が実現できると考えられる。こうした取り組みは、経済産業省が推進する産業保安のスマート化構想と一致しており、現在その先のIoTビジネスを見据えた開発を進めている。

Fig. 10に開発中のデータサービス構想を示す。プラントの監視情報をクラウドで共有し、設備保全記録や既設のセンサーデータと関係づけを可視化する。これまで熟練作業者のノウハウに依存していた保全作業をデータ化し活用する（スマート化）ことで、プラント経営の課題だった保全業務の最適化やアセットマネジメントの効率化が可能になると考えている。

## 5 おわりに

我々が開発したガス監視システムはガスを映像としてわかりやすく表示するとともにさまざまな情報を提供することで、プラント事故発生リスクの最小化を図ることができるものと考えている。さらには、監視データとその他のデータの組み合わせ等のデータ利活用により、プラント経営の効率化にも寄与できるものと考えている。

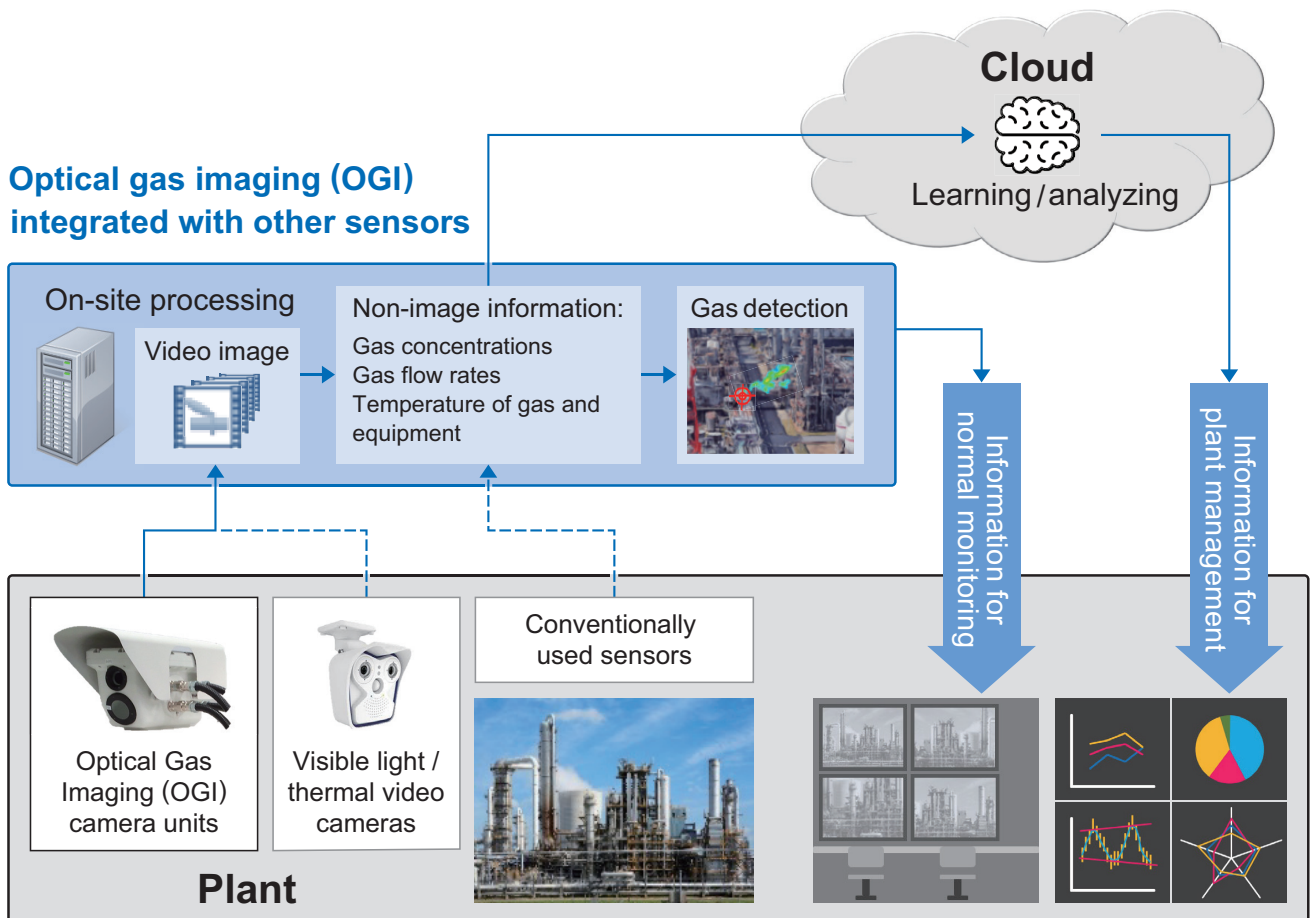


Fig. 10 The concept of data service business.