レーザー超音波法によるガスの3次元空間分布計測[†]

落 合 誠*・黒 木 雅 彦**・小久保 隆**
久 保 克 己*・兼 本 茂*

A New Method for 3-Dimensional Visualization of Distributed Gas Using Laser Ultrasonic Technique

Makoto OCHIAI*, Masahiko KUROKI**, Takashi KOKUBO**,
Katsumi KUBO* and Shigeru KANEMOTO*

A new method for diffused gases detection and location in an open space using laser ultrasonic technique is proposed. When a laser pulse which is tuned to an absorption line of a gas molecule is irradiated to a localized concentration of the gas, an acoustic pulse is generated. As to a photo-acoustic effect in an open space, it is newly found that the signal has a frequency of about 40 kHz and a propagation directivity which is perpendicular to the laser axis. In the feasibility test, methane gas molecules are excited by an optical parametric oscillator (OPO) type laser source which has a wavelength of 1330 nm and an output power of about 5 mJ per pulse. Array microphones and 2-dimensional laser scanning system are used for detecting the gas distribution. A 3-dimensional visualization result applying to methane gas leakage is presented.

Key Words: laser ultrasonic, photo acoustic, gas sensor, methane, array microphones

1. はじめに

種々の産業や環境保全で色々なガスセンサが使用されているが、それらの用途は主に成分分析とリーク検知に大別できる。このうち、ガスセンサでリーク検知を行う場合には、極微量のガス検出もさることながら、特にリーク位置の同定の観点から、その空間的な分布状況の計測が重要である。

従来、火力プラントでの燃料ガスリーク検知には、接触燃焼式ガスセンサや光干渉式ガスセンサが用いられてきた。しかしこれらの手法はガスを測定装置内まで吸引して分析するため、測定に時間遅れが生じ、また漏洩部位の特定が困難であるという機能的な制約があった。

一方、燃料ガスの主成分であるメタンガスはある特定波長の光を吸収し、また、吸収したエネルギーを音響的に再放出する性質を持つことが知られている(光音響効果)。メタンガ

スによる光の吸収現象の応用例としては、吸光式ガスセンサが測定対象の選択性の高いガス検知の一手法として既に実用化の段階に達している^{1),2)}。また、セル内に閉じ込めた測定対象にレーザー光を照射し、発生する音波をセルの共振音として検出する光音響分光分析法も、極めて高感度な微量分析法としてよく知られている³⁾。更に、この光音響効果をセル内でなく、開空間で発生させる試みも行われている⁴⁾。

本論文ではこれらの研究を発展させ、開空間におけるレーザー光とガス分子の光音響効果を用いた新しいガス分布のアクティブセンシング手法を提案する。本研究の特徴は、開空間における光音響信号の発生と伝播現象を明らかにするとともに、その特性に基づき、マイクロフォンアレイによる音源位置同定手法を適用することで、音源すなわちメタン分子の存在位置を空間的な分布として再構成することにある。これにより、従来不可能であった、測定対象ガスの選択性の高い、不可視ガスの3次元分布計測が可能となった。以下に本手法に関する検討および試験結果を述べる。

2. レーザー超音波法によるガス分布計測

2.1 光とメタン分子の相互作用

ガス分子による特定波長光の選択的な吸収現象は、光と分子の代表的な相互作用としてよく知られている。一般に、基底状態 S_0 にある分子に、任意の励起状態 S_n と基底状態 S_0 の差に相当するエネルギー $E_{S_n-S_0}$ の波長の光を照射すると、

[†] 第36回 SICE 学術講演会で発表(1997・7)

* (株)東芝原子力技術研究所 横浜市磯子区新杉田町8

** 東京電力(株)エネルギー・環境研究所 横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1

* Nuclear Engineering Laboratory, Toshiba, Isogo-ku, Yokohama

** Energy and Environment R & D Center, Tokyo Electric Power Company, Tsurumi-ku, Yokohama
(Received December 4, 1997)

(Revised June 4, 1998)

光エネルギーが分子に吸収され、光の透過エネルギーの減衰と、分子の内部エネルギーの増加(励起)現象が生じる。メタン分子のような四面体構造の分子は振動励起に対して4つの基準モードを持ち、おのおのに対応する振動数 $\nu_1, \dots, \nu_4$ は異なる値となる。またそれらの倍音モード、結合音モードがあることが知られている。メタン分子の代表的な吸収波長を Table 1 に示す⁵⁾。光の透過量 $Pt(\lambda)$ は、波長 λ の光に対する分子の吸収係数 $\alpha(\lambda)$ 、分子濃度 c 、分子と光が相互作用する長さ L を用い、照射光強度 $Pi(\lambda)$ として

$$Pt(\lambda) = Pi(\lambda) \cdot \exp\{-\alpha(\lambda)L\} \quad (1)$$

で表される。吸収法はこの原理を用いたもので、 $Pt(\lambda)$ と $Pi(\lambda)$ の比を測定することで濃度と光路長の積 cL 、すなわちレーザー光に沿った積算ガス濃度を求める手法である。

一方、励起された分子は化学変化などを伴わない限り、何らかの形態でそのエネルギーを外部に放出して基底状態へと緩和する (Fig. 1)。外部へのエネルギー放出形態は代表的には光(輻射過程)と熱(衝突過程)があるが、このどちらを経由するかはその分子の性質と系の状態に依存する。定性的には、励起準位 S_n が比較的安定であり、分子のその準位における寿命が長い場合には、励起分子は他の分子と衝突を繰り返すことによってそのエネルギーを失うため、主に衝突過程を経由する。常温常圧下のメタン分子はこの状態にあり、たとえばプラントのある系統から大気へのメタンガスリークなどの事象を想定すると、励起エネルギーの大部分は熱、すなわち圧力波として放出されると考えることができる。

Table 1 Typical absorption lines of methane

Band	Wavelength (μm)
Combination $\nu_2 + 2\nu_3$	1.33
Over-tone $2\nu_3$	1.66
Fundamental ν_3	3.31
Fundamental ν_1	3.43
Fundamental ν_2	6.52
Fundamental ν_4	7.66

Fig. 1 Schematic diagram of laser-molecules interaction

2.2 開空間における音波の伝播プロセス

大気中にある広がりを持って拡散したガス分子に、その吸収線と同調させた口径の十分細いレーザー光を照射した場合を考える。このとき、分子による光の吸収現象はレーザー光の伝播経路上の各点で発生し、結果として励起分子は光軸に沿って線状に分布することになる。ここで衝突による緩和時間が十分短いとすると、光軸上に分布した励起分子の分布がそのまま音源形状となる。このようにある長さをもった線状音源から発せられる音波は、空間的な位相整合作用により、音源の長さ δ 、音波の波長 Λ 、音源の長さ方向と垂直を 0° とした角度 θ を用いて

$$D(\theta) = \left| \frac{\sin\left(\frac{\pi\delta}{\Lambda} \cdot \sin\theta\right)}{\frac{\pi\delta}{\Lambda} \cdot \sin\theta} \right| \quad (2)$$

で表される指向性 $D(\theta)$ を持つことが知られている⁶⁾。いくつかの δ/Λ についてこの関係をプロットすれば明らかであるが、音源の長さ δ が増すに連れて $\theta=0^\circ, 180^\circ$ 方向への音波の集中が目立つようになり、またある δ においては音源の長さ方向、すなわち光軸に沿った方向には音波が伝播しないことがわかる。従って、未知の広がりを持つガス分布にレーザー光を照射してその音波を検出する場合には、検出系をレーザー光に沿った位置に配置するよりも、レーザー光と垂直方向に配置したほうが有利であることが分かる。

2.3 音響検出によるガスの位置同定

2.1 項では、メタン分子に、その吸収線に同調させたレーザー光を照射すると音波(圧力波)が発生することを述べた。エネルギーの放出形態が音であれ光であれ、この放出現象は光と分子が相互作用したその位置で発生しており、波動伝播にはその発生位置の情報が含まれている。この点が光軸に沿った積算現象を観察する吸収法と大きく異なる点である。

光音響法による3次元的な音源位置同定を考えた場合、光軸に垂直方向の2次元はレーザー光の照射方向を走査したり、拡大したレーザービームを空間全体に照射することで情報を得ることが可能である。一方、レーザー光に沿った方向(深さ方向)の情報を得る手法としては下記の3つが考えられる。

(1) 飛行時間差法(TOF法)

光源からパルスレーザー光を開空間に向けて照射する場合を考える。レーザー光の伝播速度が十分早く、かつ励起分子の衝突緩和寿命が十分短いとすると、照射と同時に光軸上のメタン分子とレーザー光が相互作用し、光音響信号が発生すると考えてよい。そこで、Fig. 2(a)に示すように、レーザー光源の近傍にマイクロフォンを配置し、伝播してくる音響信号を時系列信号として検出すれば、その伝播時間 t と空間中の音速 v_s から音源の深さ方向の位置を同定することが可能である。Brassingtonはこの手法を用いて約100 mの測定距離を10 cm オーダーの分解能で純粋メタンガスの空間的な位置同定が可能であることを示している⁴⁾。

この手法は1本のマイクロフォンで実現可能なため装置構

Fig. 2 Methods for locating the sound source

成が簡単であり、また信号処理も比較的容易であるというメリットがある。ただしこの手法の場合、検出系はレーザー光軸に沿った位置に配置することが必要であるが、2.2項で述べたようにこの方向は音波伝播のノードになる可能性があるという欠点がある。

(2) 位相差検出法

光音響効果で発生した音波を Fig. 2(b) に示すような一定間隔 d だけ離れた複数のマイクロフォンで検出すれば、おのおののマイクロフォンに到達する音波の位相差(時間差)から、その伝播方向を知ることが可能となる。実際には、各マイクロフォンの出力信号の相関係数に相当する遅延時間 τ を求め、

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{v_s \tau}{d} \right) \quad (3)$$

の関係から音波の伝播してきた方向 θ を求める。この情報とレーザー光の照射方向から音源の3次元的位置を得ることができる。飛行時間法と比較すると、検出系の配置場所を任意に選ぶことが可能で、しかも光源がパルスレーザーでなく、連続波を発振する場合でも適用可能である。一方、Fig. 2(b) からも明らかなように、マイクロフォンの配置間隔 d が音波の波長 λ より長くなると音源の虚像が測定されるようになるため、マイクロフォンの配置には注意が必要である。

(3) 基準時間を用いた位相差検出法

これは飛行時間差法と位相差検出法を組み合わせた手法であり、パルスレーザーの照射による音波の発生時刻を基準とした位相差検出法とも言える。最も単純な、1点の点状音源から発生した音波を n 本のマイクロフォンで検出してその音源の位置を同定する場合を考える。パルスレーザーの発振時刻とおのおののマイクロフォンへの音波の到達時刻の時間差 t_n を測定すれば、音源は各マイクロフォンを中心とした半径 $r_n = v_s t_n$ の球の交点として求めることができる。このような単純な音源分布を考える場合には、もはやレーザー光の照射方向に関する情報は不要であり、またマイクロフォンの配置にも制限はない。3次元的位置同定のためには、厳密には4

本以上のマイクロフォンが必要であるが、たとえばレーザー光を照射しない方向には音源はない、などの制約条件を付加することで多くの場合3本以下にすることが可能である。ただし、空間的に複雑な分布計測を行う場合には、測定された時系列信号とレーザー光の照射方向情報から、音源分布を逆問題として推定するアルゴリズムが必要である。

以上の3手法はいずれも光音響法によるガス分布計測に適用可能であり、おのおのの特性を知った上で、測定対象や条件に最も適切な手法を選択すればよい。プラントのある系統から大気へのガスリーク事象を想定すると、ガス濃度はリーク位置で非常に高く、比較的速やかに拡散して背景レベルまで低下すると仮定できる。そこで本報告では、特に(3)の手法を用いてガス分布の可視化を試みた。

3. ガス分布の可視化試験

3.1 光音響信号の基礎特性

本手法の成立性を検証するため、開空間での光音響信号の基礎特性把握試験を行った。試験で使用した励起用パルスレーザー光源(OPO: Opto-Parametric Oscillator)とマイクロフォンの仕様を Table 2 に示す。

測定対象としては、約0.25 MPaの圧力でφ6 mmのノズ

Table 2 Specification of the experimental setup

Items		Details
Laser Source	Type	OPO excited by TH-YAG
	Wavelength	1.33 μm
	Spot Size	$< \phi 3 \text{ mm}$
	Pulse Duration	3 nsec — 5 nsec
	Output Power	5 mJ
	Repetition	10 Hz
Microphone	Type	Condenser Type
	Sensitivity	-47 dB (at 0 dB=1 V/Pa)
	Diameter	$\phi 7 \text{ mm}$
	Frequency Band	20 Hz — 100 kHz

ルから大気に噴出させた99.9999%のメタンガスを用いた。噴出口近傍にパルスレーザー光を照射し、光軸と垂直方向に約100 mm離れた位置にマイクロフォンを配置して測定した光音響信号をFig. 3に示す。ここで、Fig. 3(a)はレーザー光発振時刻をトリガー($t=0$)として16回の平均処理をした後の時系列信号、Fig. 3(b)は光音響信号の周波数スペクトルである。この結果から、光音響信号はノズルとマイクロフォン間の距離に応じた時間遅れをもって、開空間においても良好なS/N比で検出できた。この光音響信号は圧力レベルが約100 Pa、持続時間が約300 μsec であり、約40 kHzを中心周波数とした超音波であるが、筆者らの検討した限りでは、なぜ開空間における光音響信号が40 kHzにピークを持つか、その理由は明らかでない。

次に、発生する音響信号の空間的な指向性を測定した。ノズル位置を中心とする半径100 mmの円周上に、レーザー光の伝播方位からその垂直方位まで、 10° 刻みにマイクロフォンを配置して、各々の方位に伝播する音響信号レベルを測定した。結果をFig. 4に示す。図ではレーザー光の伝播方向を横軸($90^\circ-270^\circ$ 方向)、ノズル位置を原点にとっている。図中

Fig. 3 Typical waveform of the photo-acoustic signal

Fig. 4 Directivity of the photo-acoustic signal in an open space

の実線は、発振周波数40 kHz、長さ6 mm・12 mm・24 mmの音源を想定し、(2)式をもとに計算した音波の指向性である。測定データの分布は、2.2項で推定したように、光軸の垂直方向の方への伝播強度が光軸沿った方向に比べて約5倍大きくなっており、音源長さ12 mmの場合の分布とよく一致した。この結果は、従来のガス検知手法では不可能であった、ノズル出口における噴出ガスの空間的な広がりが計測できたことを示している。

マイクロフォンをガス噴出ノズルから光軸と垂直方向の100 mm離れた位置に配置し、メタンガス濃度を窒素ガスと混合することで調整し信号レベルの推移を測定した。結果をFig. 5に示す。音響信号強度はガス濃度だけでなく測定距離にも依存するため、図では信号レベルを純粋メタンガスの場合の信号レベルで規格化して示した。式(1)より、ガス分子によって吸収される光エネルギー $P_{ab}(\lambda) = P_i(\lambda) - P_t(\lambda)$ が、発生する音響強度 $P_{ac}(\lambda)$ と比例するとすると

$$P_{ac}(\lambda) \propto P_i(\lambda) [1 - \exp\{-c\alpha(\lambda)L\}] \quad (4)$$

となる。簡単のため吸収係数 $\alpha(\lambda) = 1$ として音響強度 $P_{ac}(\lambda)$ と光軸上の積算ガス濃度 cL の関係をプロットするとFig. 5に実線で示した曲線となり、1%以上の領域では計測結果とよく一致した。また、現状のシステム構成で測定距離100 mmとした場合、ノイズレベルはFig. 5の点線の通りであり、光軸に沿ったガスの広がりを10 mmとすると、その単位長さ当たりの検出下限濃度は約2%・mmであった。

一方、噴出ガス濃度を純粋メタンとし、測定距離を変えていった場合の測定距離と信号検出までの遅れ時間の関係をFig. 6に示す。グラフの傾きは約350 m/secであり、これは室温の音速とほぼ等しい。また現状システムにおいてS/N比で2以上を確保できる測定距離は約3.2 mであった。これら濃度依存性、測定距離依存性は装置の性能として重要な指標であるが、システム構成を最適化することで今回の結果を比較的容易に上回ることが可能と考えられる。たとえば、今回の試験ではレーザー波長はメタン分子の吸収線の結合バンド

Fig. 5 Relation between gas concentration and signal level

Fig. 9 Projection diagram of the diffused methane gas distribution (gray scale)

(0, 200, 0) と (0, 250, 0) に配置されている。まず (a) では、原点から $y=100$ に至る y 軸に沿ったガスの局在が認められ、 $(x, z)=(0, 0)$ に投影されたノズル先端から、上方に向かって噴出するメタンガスが測定できていることがわかる。この方向から見ると 2 つのノズルは奥行き方向に完全に重なるため、この図だけからは後側のノズルの存在は明らかでない。一方、(b) では $y=200, 250$ に 2 つのガス濃度の局在が認められ、ノズルが 2 個存在していることがわかる。以上の結果から、本手法によって約 50 mm 離れた 2 つのノズルから上方に噴出されるメタンガスを良好に分離して空間分布を計測できることがわかった。なお、レーザー光がスクリーンに当たった衝突音も $x=400$ にほぼ直線状に見られる微弱(淡色)信号として同時に確認されており、この信号は本測定においてはノイズである。

4. ま と め

本研究における検討および試験結果から、開空間においてレーザー光とガス分子が相互作用して発生する光音響信号は超音波領域の周波数を持ち、光軸と垂直方向に空間的な指向性をもって伝播することが明らかになった。また、パルスレーザー光の発振時刻を基準として複数のマイクロフォンで検出した音波の位相差を解析することで、大気中に拡散したガス分子の 3 次元的な分布を計測可能であることを初めて実験的に検証した。この手法は不可視ガスの 3 次元的な空間分布を可視化できるばかりでなく、特定のガス種に非常に高い選択性を持つという特徴がある。当然、複数のガス種のおおの空間分布を別々に測定することも可能であるし、またガス以外の濃度分布測定にも適用できる可能性を有している。

一方、本試験の測定はいずれも既知の音源位置に対してマイクロフォンを正対させて計測したものである。使用したマ

イクロフォンの口径は 7 mm であるが、これは周波数 40 kHz の音波の波長とほぼ等しいため、音波の入射角度に対して受信強度が変化する。例えば、今回使用したマイクロフォンでは、入射角度 0° の場合と 90° の場合では約 15 dB の感度差がある。実際のガス検知では音源位置は未知であるため、推定された音源位置からの音波の入射角度に依存した信号レベル校正が必要となる。

また本試験では、レーザーライン上に音源が 1 個という仮定に基づいてその分布を再構成したが、実際には複数のガスの局在、あるいは連続的に広がったガスの分布なども想定される。この場合には、手前のガス分子によって吸収された残りのレーザー光がより後方のガス分子と相互作用する、といった光の吸収伝播モデルが不可欠となり、今回のような、ガス濃度に依存した強度の音波が発生し、それが伝播減衰してマイクロフォンに到達するといった取り扱いでは、正確な濃度計測が不可能である。

今後これらの課題を解決し、新しいリモートセンシングの一手法として、本手法の応用を幅広く検討していく予定である。

参 考 文 献

- 1) 田井秀男, 上原喜代治: Remote detection of methane by using a $1.7\mu\text{m}$ diode laser, レーザー研究, **19-9**, 889/894 (1991)
- 2) K. Chan, H. Ito, and H. Inaba: 10 km-Long Fibre-Optic Remote Sensing of CH_4 Gas by Near Infrared Absorption, Appl. Phys. B, **38**, 11/15 (1985)
- 3) たとえば, 沢田嗣郎編: 光音響分光法とその応用-PAS, 学会出版センター(1982)
- 4) D. J. Brassington: Photo-acoustic detection and ranging—a new technique for the remote detection of gases, J. Phys. D: Appl. Phys., **15**, 219/228 (1982)
- 5) 陳 建培, 伊藤弘昌, 小林喬郎, 稲葉文男: CH_4 ガスの近赤外

域吸収分光とその光ファイバ遠隔計測への応用, Opt. Quantum Electron., 82, 101, 43/48 (1982)

- 6) たとえば, 西山静男, 池谷和夫, 山口善司, 奥島基良共著: 音響振動工学, コロナ社(1994), 61.
- 7) K. Chan, H. Ito, and H. Inaba: All-Optical-Fibre-Based Remote Sensing System for Near Infrared Absorption of Low-Level CH₄ Gas, Journal of Lightwave Technology, LT-5-12, 1706/1711 (1987)
- 8) 田井秀男, 松浦正行, 田中弘明, 上原喜代治: 半導体レーザーによるメタン検知, 光学, 19-9, 616/619(1990)

[著者紹介]

落合 誠 (正会員)

1991年3月慶応義塾大学大学院修士課程(計測工学)修了。同年4月(株)東芝入社後, 原子力技術研究所にてレーザーや超音波を用いた検査・計測技術の開発に従事。日本原子力学会, 溶接学会の会員。

黒木 雅彦

1986年3月東京大学工学部卒業。89年-90年スウェーデン王立工科大学機械工学科研究員。91年3月東京大学工学系研究科博士課程修了, 工学博士。同年4月東京電力(株)入社。同社エネルギー・環境研究所にて作業用ロボット, 異常検知, 検査技術等の研究に従事。

小久保 隆 (正会員)

1980年3月成蹊大学大学院修士課程(電気工学)修了。同年4月東京電力(株)入社。現在, 同社エネルギー・環境研究所にて発電プラントの制御に関する研究開発に従事。電気学会の会員。

久保 克巳

1968年4月(株)東芝入社。原子力技術研究所にて, 放射線計測, 点検ロボットシステムの開発を行う。現在は画像処理を用いた検査システムの開発に従事。日本原子力学会の会員。

兼本 茂 (正会員)

1976年3月大阪大学大学院修士課程(原子力工学)修了。同年4月日本原子力事業(株)入社。1989年(株)東芝移籍後, 原子力技術研究所にて, 原子力発電プラントの異常診断技術の研究開発に従事。日本原子力学会の会員。