

# レーザーを用いた広域 CO<sub>2</sub> 漏えい検知技術の開発

## Development of Technology for Monitoring of CO<sub>2</sub> Emissions Over Wide Areas Using a Laser System

伊 澤 淳 技術開発本部基盤技術研究所応用理学研究部 主査 博士（工学）  
大 海 聡一郎 技術開発本部基盤技術研究所応用理学研究部  
稲 元 智 行 株式会社 IHI エアロスペース 基盤技術部基盤技術室  
久保田 伸 彦 技術開発本部総合開発センター化学システム開発部 部長 博士（工学）

レーザー技術を用いて CO<sub>2</sub> の漏えい検知を遠隔で広範囲（数 km）に行う装置の開発を進めている。今回、試作した小型可搬型の計測装置によって大気中および燃焼排気ガス中の CO<sub>2</sub> 検出試験を行った。当社独自開発の装置によって、横浜事業所内屋外の距離約 130 m までの大気中の CO<sub>2</sub>、および燃焼プラントの燃焼排気ガス中の CO<sub>2</sub> 検出に成功した。本稿では、レーザーによる CO<sub>2</sub> 漏えい検知技術の概要、当社の技術の特長および装置特性、本装置を用いた CO<sub>2</sub> 検出試験結果について述べる。

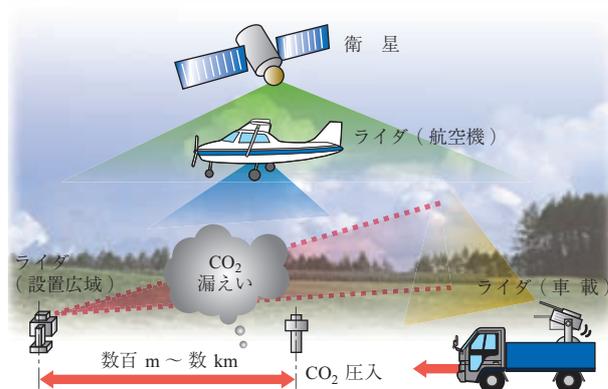
We are developing a system for the remote monitoring of CO<sub>2</sub> across wide areas (several kilometers) using laser technology. We have measured atmospheric CO<sub>2</sub> and that contained in combustion gases using our compact and portable test system. We were successful in measuring atmospheric CO<sub>2</sub> and that contained in exhaust gases from a combustion plant over a distance of 130 meters by using our original system that is based on a commercial laser. In this paper, we provide an outline of CO<sub>2</sub> monitoring using a laser system, and describe its innovativeness and characteristics, together with the results of CO<sub>2</sub> measurements using it.

### 1. 緒 言

昨今、地球温暖化による環境への深刻な影響が懸念されている。温暖化の原因は、化石燃料の燃焼などの人類による大量排出によって CO<sub>2</sub> の大気中濃度増加が有力であることが最近の研究で明らかになってきている。CO<sub>2</sub> の濃度増加の抑制、すなわち排出量削減のため京都議定書が締結され、先進国を中心とした世界各国でこれに基づくさまざまな CO<sub>2</sub> 削減の取り組みが行われている。

このような状況下で、CO<sub>2</sub> の発生源であるボイラなどから排出される CO<sub>2</sub> を分離回収し、地中・海中に貯蔵する技術（CCS）の研究が進められている。CO<sub>2</sub> を固定化することによって環境への影響をなくし、排出そのものを削減したとみなす手法である。将来 CO<sub>2</sub> の排出規制が厳しくなり、ボイラのような大規模 CO<sub>2</sub> 排出施設において回収義務が課される可能性は非常に高い。

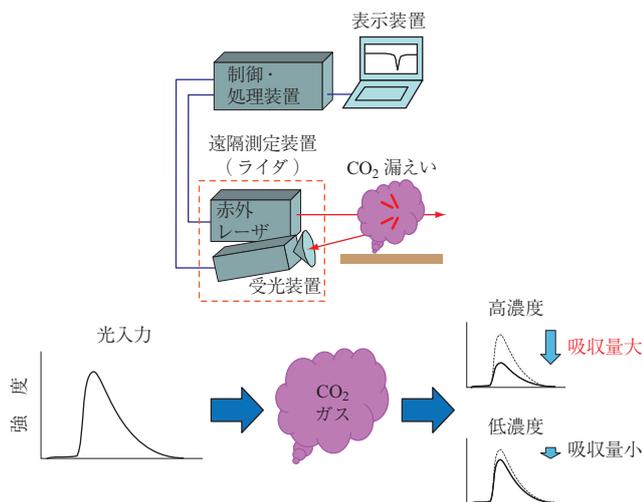
一方、これらのプロセスにおいては安全・環境の観点から広域（>km 周囲）に漏えいを監視する手段・装置が必要である。第 1 図に広域 CO<sub>2</sub> 漏えい検知技術の概念を示す。特に貯蔵設備は広大であるため、従来のサンプリングでは常時監視は困難であり、検知器によるピンポイント計測でも広域なエリアすべてを常時監視するためには、装置



第 1 図 広域 CO<sub>2</sub> 漏えい検知技術の概念  
Fig. 1 Wide-area CO<sub>2</sub> emission monitoring

が多数必要になり現実的ではない。これに対し、レーザーを用いたリモートセンシング技術によって、CO<sub>2</sub> をはじめとするガス成分を広域に検知・計測する機器は長年研究されている。レーザーによるガス検知の方式は、① 光吸収 ② ブレークダウン ③ 非線形光学（ラマン、多光子ほか）、などの方式が一般的である。なかでも、CO<sub>2</sub> の漏えい検知においては光吸収を用いた方式が用いられている。

光吸収方式の原理を第 2 図に示す。CO<sub>2</sub> などガスの吸収波長の微細構造に同調し、吸収線の 1 本と同程度の帯



第2図 光吸収によるガス濃度計測の原理(差分吸収)  
 Fig. 2 Principle of measurement of gas concentrations using optical absorption (Differential absorption)

域幅の光をガス中に入射し、散乱光を検知する。このとき、光はガスによって吸収され、減衰する。このときの透過率  $T$  はランベルト・ベール則によってガスの濃度  $N$  および存在する距離(光路長  $L$ ) とガス種別および波長に基づく固有値(吸収係数  $\alpha$ ) と関係づけられる。関係式を(1)式に示す。

$$T = \exp(-\alpha NL) \dots \dots \dots (1)$$

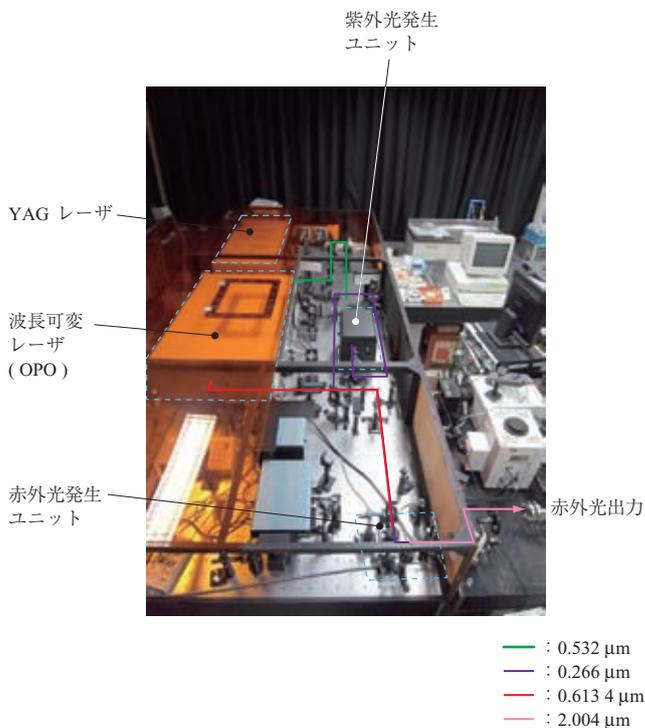
これによって、ガスの種別と濃度(光路長積分値)を推測できる。さらに、大気中のほかの減衰要因(粉じんなど)の影響を排除するため、通常は対象ガスで吸収する波長(ON)としない波長(OFF)を切り替えて、その減衰量の差分から特定のガスの濃度を算出することができる。この方式は差分吸収方式と呼ばれており、ガス種別によって異なる特定の吸収波長に同調させたレーザー光源が必要になる。一方で、定量化が容易であること、信号強度が他方式に比べ高く長距離計測に有利であること、といった利点がある。

CO<sub>2</sub> をはじめとするガス成分の計測においては、赤外光領域(>0.75 μm)に多数の吸収波長が存在する。赤外光領域の計測技術は環境分野、エネルギー分野、セキュリティ分野をはじめ多種多様な応用の可能性を秘めているが、発生および検知を行うための実用的なデバイス(光源、受光素子など)の開発が紫外・可視域に比べ遅れており、これを用いた計測システムの実用化も進んでいなかった。しかし、この数年で研究が急速に活性化しており、近い将来には実用化開発の花形になると予想される。

## 2. レーザによる広域 CO<sub>2</sub> 計測における課題

CO<sub>2</sub> の吸収波長は近赤外光以上の波長域に多数存在するが、大気中の広域(長距離)計測における最大の妨害要因である水蒸気の吸収線を回避し、かつ、実用的な吸収量をもつ波長としては、1.6 μm 帯、2 μm 帯、4.3 μm 帯がある。これらのうち 1.6 μm 帯は高出力なレーザー光源や受光感度の高い検知器が最も入手しやすくハードウェアとしての完成度が高い。しかし、三つの波長帯のなかで最も吸収量が小さく、高い距離分解能や微量ガスの検知が難しい。一方で、4.3 μm 帯は吸収量が最も強く近距離/高距離分解能、高感度検知に向いているが、光源・検知器が未発達で、素子の冷却が必要であるなど機器の扱いに課題がある。筆者らは、システムとしてのバランスを考慮して、二つの波長帯の中間的特性をもつ 2 μm 帯を採用した。

第3図に差分吸収方式による CO<sub>2</sub> 検知装置システムの一例を示す。この装置は本研究に先立ち、計測原理の社内確認のため試作したものである。狭帯域パルス YAG レーザの 3 次高調波励起の OPO(光パラメトリック発振器: いずれも市販品)によって発生した可視光(波長 0.613 4 μm)の 2 次高調波によって、0.306 7 μm の紫外光を得ている。一方で、前述の YAG レーザに残存する 2 次高調波(0.532 μm)から 4 次高調波(0.266 μm)を発



第3図 差分吸収方式による CO<sub>2</sub> 検知装置システムの一例  
 Fig. 3 Example CO<sub>2</sub> detection system using the differential absorption method

生させ、波長  $0.266 \mu\text{m}$  と波長  $0.3067 \mu\text{m}$  からの差周波発生によって  $\text{CO}_2$  の吸収波長（中心波長約  $2.004 \mu\text{m}$ ）の狭帯域光（線幅  $0.04 \text{ nm}$ ：計算値）を発生させている。市販されているレーザをベースとして、当社で赤外光発生部の改良を加えたこの装置による室内基礎試験によって、 $\text{CO}_2$  の検知濃度  $100 \text{ ppm}$  以下（ $100 \text{ m}$  換算）を確認した。また計測距離においても、得られたデータに対して信号強度を距離二乗則（信号強度は距離の二乗に反比例する）のスケーリングをすることによって、集光レンズの設計修正など装置の最適化によって数百  $\text{m}$  以上の計測距離が見込めることが明らかになった。

しかし、このような装置は、①大規模かつ複雑な装置でコストも1台数千円～1億になる②複雑な装置は故障のリスクが高いため設置環境（温度、湿度など）に制約を受ける③メンテナンスに高度な技術者が一つの貯留設備をカバーするために、数台から数十台が必要である、ことなどを考慮すると、監視装置としての許容コストに見合わない。これらの装置はいずれも高度な計測用途を目的としており、前述の用途への応用は難しい。CCS貯留設備の漏えい検知への適用を想定した場合、以下のような装置が望ましい。

- ・1台で  $> \text{km}$  の周囲をカバーできること。
- ・想定コストは  $1 \sim 2$  千万円/台であること。
- ・メンテナンスは現場作業員が容易に可能であること。
- ・小型可搬型であること。
- ・最低検知濃度は  $100 \text{ ppm}$  オーダ（ $100 \text{ m}$  換算で）であること。

設置型の装置を想定した場合は必ずしも小型可搬型は必須ではない。しかし、設置される場所に制約（寸法、耐荷重など）を受ける場合や、さまざまな場所でのフィールドテストなども想定すると小型可搬型であることは運用上重要になる。 $\text{CO}_2$  計測においてこのようなシステムを実現するためのレーザ光源は市販品で利用可能なものが存在せず、このシステムに特化した光源を別途開発する必要がある。

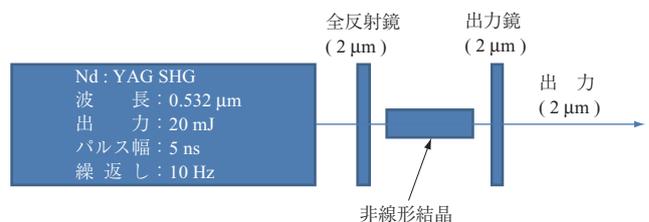
### 3. 小型可搬型装置の試作と室内試験結果

従来の方式における課題を解決するため、筆者らは広帯域光源（数  $\text{nm}$  程度）による広域  $\text{CO}_2$  計測装置を考案し<sup>(1)</sup>、装置の試作を行った<sup>(2)</sup>。従来型の狭帯域光源による装置に比べ検知濃度（濃度）の面で不利であるものの、装置設計が容易であり、小型・低コストの装置が実現可能

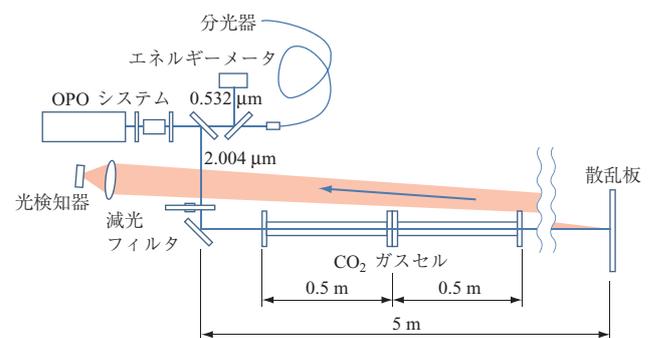
である。また検知濃度についても、 $\text{CO}_2$  は大気中にも存在する成分であり、漏えい検知にターゲットを絞れば検知濃度に対する要求レベルは本装置において十分実現可能なレベルになる。

この装置を実現するに当たり、市販レーザを励起光源にした OPO による赤外光発生装置を当社で開発した。この装置は市販品に対して波長可変範囲を制限しているほか、広帯域の赤外光発生を前提としているため、狭帯域化の機構が不要になるなど  $\text{CO}_2$  計測に特化した設計とすることによって、小型・低コスト化を実現している。第4図に本装置の原理実証試作機の概要を示す。市販のパルス Nd:YAG レーザの2次高調波（波長  $0.532 \mu\text{m}$ 、出力  $20 \text{ mJ}$ 、パルス幅  $5 \text{ ns}$ 、繰返し  $10 \text{ Hz}$ ）を励起光とした OPO によって  $\text{CO}_2$  の吸収波長である約  $2.004 \mu\text{m}$  を発生させている。パルス幅は  $10 \text{ ns}$ 、出力は最大  $500 \mu\text{J}$ 、波長線幅は約  $5 \text{ nm}$  (FWHM) である。

本装置の性能評価を目的として、室内における  $\text{CO}_2$  計測（検出感度の検証、遠隔計測の検証）を実施した。第5図に評価試験概要を示す。この試験は、装置からの距離  $5 \text{ m}$  に散乱板としてプラスチック板を設置し、散乱光を検知している。 $\text{CO}_2$  の濃度は、装置と散乱板の間に設置された吸収セル内の  $\text{CO}_2$  の分圧（バランス  $\text{N}_2$ ）によって変化させている。



第4図 小型可搬型装置の原理実証試作機の概要  
Fig. 4 Compact and portable system for demonstration of the monitoring principle

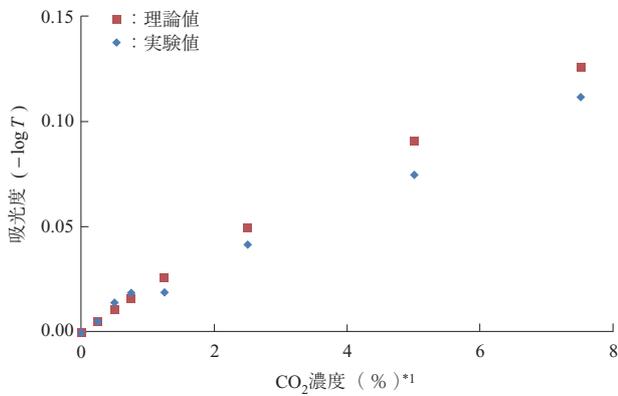


第5図 室内による試作機の評価試験概要  
Fig. 5 Indoor evaluation trial of system

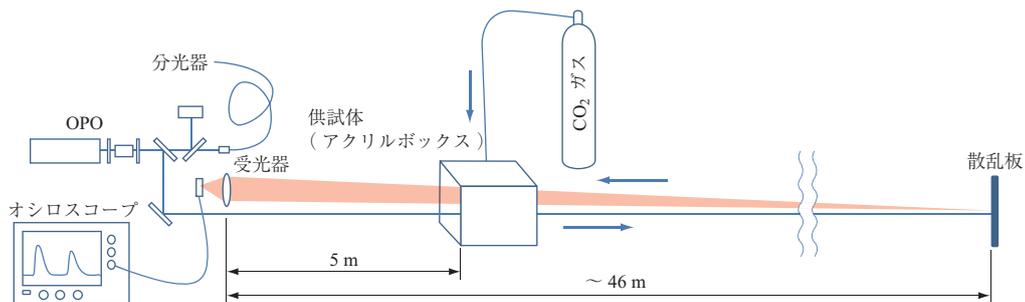
第6図にCO<sub>2</sub>検出感度の検証結果(吸収量の濃度依存性)を示す。縦軸の吸収量の対数値(吸光度:  $-\log T$ )が横軸の濃度(100 m 換算)に比例して増加しており、(1)式と整合している。また、この試験結果から、装置の検出感度が100 ppm 以下(100 m 換算)であることが実証された。続いて遠隔のCO<sub>2</sub>の漏えい検知を実証するため、遠隔計測試験を実施した。吸光度の距離依存性を測定することによって、空気中のCO<sub>2</sub>の検知を実証し、CO<sub>2</sub>の純ガスによって漏えい検知を実証した。

第7図に遠隔計測および漏えい検知の試験の概要を示す。装置の距離5~46 m先に設置したついたてからの散乱光を検知し、吸光度の距離依存性を求めた。また、漏えい検知を模擬するため、5 m 地点で解放空間にCO<sub>2</sub>(濃度100%)を漏えいさせ、そのときの吸光度の変化を併せて測定した。漏えいはCO<sub>2</sub>ボンベによって計測中連続して行っている。第8図に試験結果を示す。

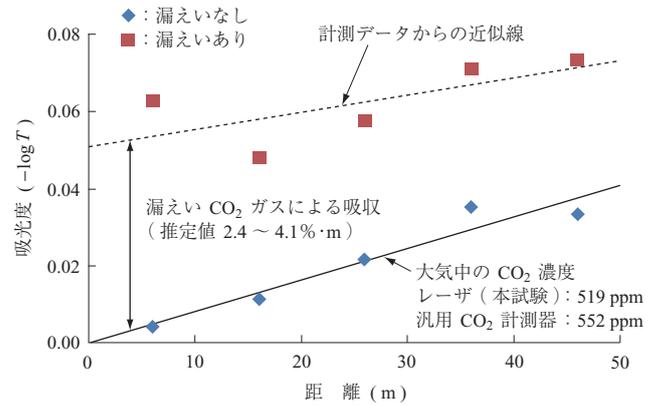
漏えいがないときの吸光度は大気中のCO<sub>2</sub>によって距離の増加に伴い比例的に増加している。また、CO<sub>2</sub>を漏えいさせたときの距離依存性は、ない場合に対してベースラインが高濃度方向にシフトしており、CO<sub>2</sub>漏えい検知の裏付けとなった。漏えいさせたときの吸光度が安定して



第6図 CO<sub>2</sub>検出感度の検証結果  
Fig. 6 Results of verification of CO<sub>2</sub> detection sensitivity



第7図 遠隔計測および漏えい検知の試験概要  
Fig. 7 Remote measurement and emission detection



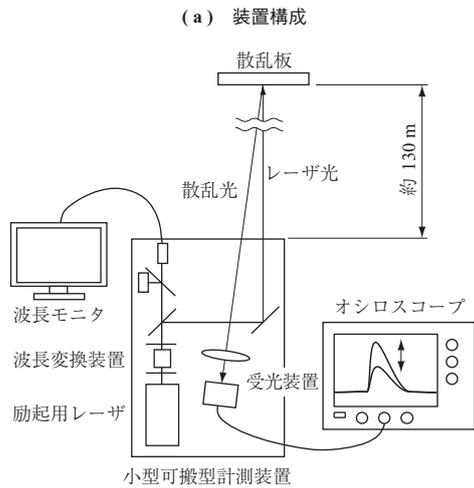
第8図 遠隔計測および漏えい検知の試験結果  
Fig. 8 Results of remote measurement and emission detection

いないのは、解放空間に漏えいさせたCO<sub>2</sub>の濃度および体積(濃度分布)そのものが安定していないことによるものと考えられる。

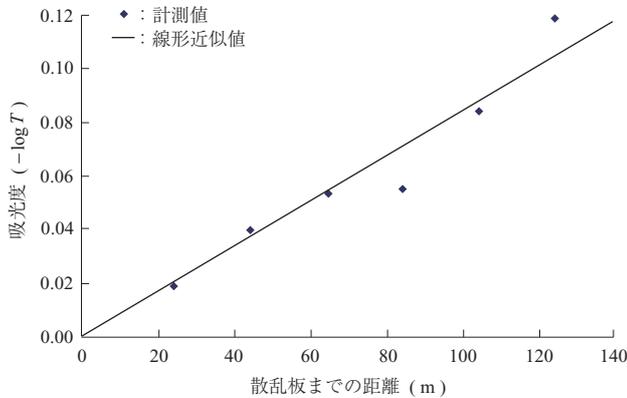
#### 4. 屋外試験結果

この装置を用いて、屋外におけるCO<sub>2</sub>検出の実証試験を行った。試験は、大気中CO<sub>2</sub>および、燃焼排気ガス中のCO<sub>2</sub>を対象とした。第9図は屋外大気中のCO<sub>2</sub>計測試験概要を示す。試験は屋内試験の距離依存性試験と同様に、波長2 μmの赤外光を屋外路上で水平に照射し、距離130 mまでの計測を行った。赤外光の仕様は室内試験と同一である。第10図に試験結果を示す。室内試験と同様に、距離の増加に伴い線形的に吸光度が増加している。絶対値については室内試験において取得した検量線から、大気濃度と同程度の計測結果が得られている。しかし、屋外環境における妨害要因(水蒸気など)の影響が推測されるため、今後、精度の検証および向上のための装置改良を行っていく。また、このとき計測された信号強度から、本装置における計測距離は1 km以上のポテンシャルをもつことが推測された。

今後、さらなる計測によって距離1 km以上の実証と最



第 9 図 屋外大気中の CO<sub>2</sub> 計測試験概要  
Fig. 9 Atmospheric CO<sub>2</sub> measurement



第 10 図 屋外大気中における CO<sub>2</sub> 計測結果  
Fig. 10 Results of atmospheric CO<sub>2</sub> measurement

長計測距離の検証を行っていく。さらに、屋外における CO<sub>2</sub> 漏えい検知を模擬的に実証することと、この装置のプラントなどの漏えい検知への適用性を探るため、燃焼排気ガス中の CO<sub>2</sub> の計測を行った。第 11 図にその試験概

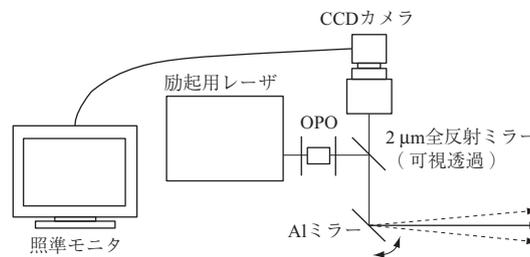
要を示す。

距離約 60 m 先の排気ダクトに照準を合わせ、ダクト本体からの散乱光によってダクトから放出される CO<sub>2</sub> の濃度を計測したものである。第 12 図に試験結果を示す。この計測において距離分解能は得られておらず、光路上の積分値であるため、別途計測した大気中の CO<sub>2</sub> 濃度を差し引き、濃度計算をしたところ 3.15 ~ 12.6%・m と算出された。この計測も解放空間における計測であるため、CO<sub>2</sub> の濃度分布の推測が困難であるが（風の影響によっても変化する）、燃焼器からの排気ガス中の CO<sub>2</sub> 濃度は 20% 程度と推測されることから、排気ガスの拡散領域を数 m と仮定するとおおむね一致しており、妥当な計測結果といえる。以上の結果から、燃焼プラントの燃焼排気ガス中の CO<sub>2</sub> 検出を実証した。

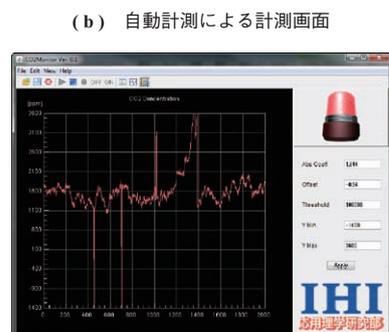
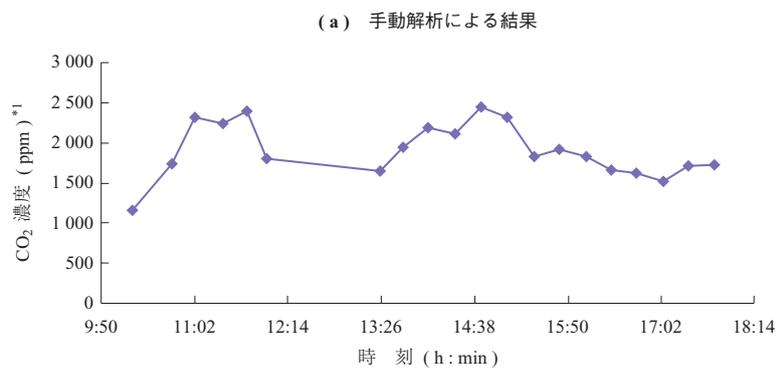
(a) 照準画面



(b) 装置構成

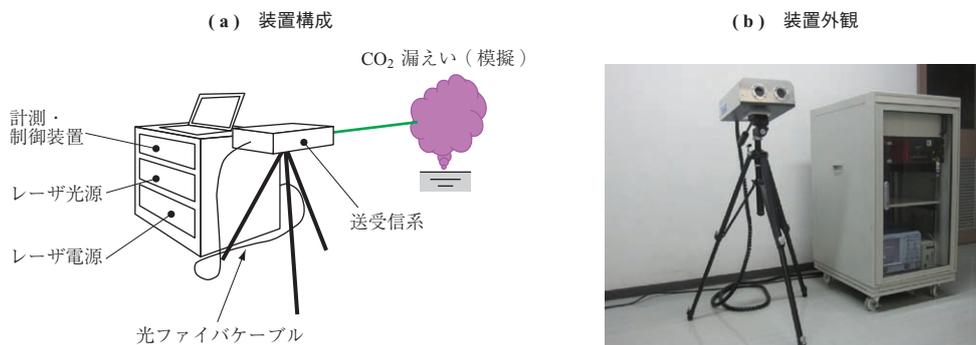


第 11 図 燃焼ガス中の CO<sub>2</sub> 計測試験概要  
Fig. 11 CO<sub>2</sub> measurement in combustion gases



(注) \*1 : 計測距離が 63 m の平均値

第 12 図 燃焼ガス中の CO<sub>2</sub> 計測試験結果  
 Fig. 12 Results of CO<sub>2</sub> measurement in combustion gases



第 13 図 要素機能確認機概要  
 Fig. 13 System for verification of functionality

## 5. 結 言

温室効果ガスである CO<sub>2</sub> を分離回収する工程における漏えいを検知することを目的とした、レーザーによる広域 CO<sub>2</sub> モニタリング装置の試作を行い、原理実証および屋内外での計測による性能評価を実施した。計測結果から、本方式による広域 CO<sub>2</sub> モニタリング装置の実現性を確認した。

現在は要素機能確認機 (第 13 図) の製作と性能評価を進めている。今後はこの装置による検出感度および計測

距離の向上, 装置化に向けた各種機能の実証とフィールド試験の蓄積を進めていく。

## 参 考 文 献

- (1) 伊澤 淳ほか：社団法人レーザー学会学術講演会 第 31 回年次大会 講演予稿集 2011 年 1 月
- (2) J. Izawa et al. : Proceedings of 2nd Oxygen Combustion Conference The IEA Greenhouse Gas R&D Programme (IEAGHG) (2011.9) p. 64