

斉藤 保典 野村 彰夫 鹿野 哲生
Yasunori SAITO, Akio NOMURA, Tetsuo KANO

信州大学工学部情報工学科

Department of Information Engineering, Faculty of Engineering,
Shinshu University

1 はじめに

CO₂レーザーは高効率で高出力が得られるため工業加工用として、また医療用として広く用いられるようになってきた。これに伴い、レーザー本体から使用地点までレーザー光を伝搬させるための、赤外ファイバの研究・開発が各所で行われている。その中で、最近、中空構造を有するCO₂レーザー用中空ファイバ(導波路)が提案され実現された。¹⁾²⁾我々は、このファイバの中空特性を活かした応用を考えたところ³⁾、長光路吸収計測へ利用できることが確かめられたので報告する。

2 原理および特徴

図1に計測システムの構成図および中空ファイバについての簡単な原理図を示した。ファイバの中空部分の屈折率(≈ 1)に対して、壁面の屈折率が小さければ(実際の中空ファイバでは $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ に対して壁面の屈折率は 0.6)⁴⁾臨界角以上で入射したレーザー光は、壁面で全反射を繰り返しながらファイバ内を伝搬していく。このとき中空部分に吸収気体(測定気体)が封入されていれば、レーザー光は減衰されて出てく

ることになる。従ってこの減衰の割合を測定すれば、ファイバ内に封入された気体の濃度を求めることができる。図1のシステムに Lambert-Beer の法則を適用すると、入出力の関係は次式のように表わされる。

$$P_{1out} = P_{in} \cdot T_1 \cdot (1 - T_4) \cdot T_F \cdot \exp(-\bar{N}\sigma L) \quad ①$$

$$P_{2out} = P_{in} \cdot (1 - T_1) \cdot T_4 \quad ②$$

ここで、 P_{1out} はファイバを通過して検出器に入るパワー[W], P_{2out} はファイバを通過せずに検出器に入るパワー(出力モニター)[W], P_{in} は発振器の射出パワー、 T_1 はミラー1での透過率、 T_4 はミラー4での透過率、 T_F はファイバ自体(測定気体が封入されていない状態)の透過率、 \bar{N} は測定気体の平均濃度[mol/m³], σ は測定気体の吸収断面積[m²], L はファイバの長さ[m]である。①②式より \bar{N} は③式で求められる。

$$\bar{N} = \frac{1}{\sigma L} \ln \left(C \cdot \frac{P_{2out}}{P_{1out}} \right) \quad C \equiv \frac{T_1 \cdot (1 - T_4) \cdot T_F}{(1 - T_1) \cdot T_4} \quad ③$$

この計測システムの主な特徴として、1)ミラーを利用した多重反射型の長光路吸収システムと違いアライメントの必要性が無い、2)ファイバ自体が吸収セルであると共に伝送線路にもなる。3)軽量化が可能である、4)遠隔計測システムが期待される、等があげられる。

3 測定誤差および最小検出濃度

誤差の主な原因は検出器内部で発生する雑音によるものと考えて良い。③式に誤差法則を適用すると、測定誤差は④式のようになる。

$$\left(\frac{\Delta \bar{N}}{\bar{N}} \right)^2 = \frac{1}{\bar{N}^2} \cdot \frac{1}{(\sigma L)^2} \cdot \left\{ \left(\frac{\Delta P_{1out}}{P_{1out}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta P_{2out}}{P_{2out}} \right)^2 \right\} \quad ④$$

$\Delta \bar{N}$ は \bar{N} の誤差、 ΔP_{1out} , ΔP_{2out} はそれぞれ P_{1out} , P_{2out} の誤差である。検出器に焦電型赤外線検出器を用いた場合の検出器での $(S/N)_{det.}$ は⑤式の

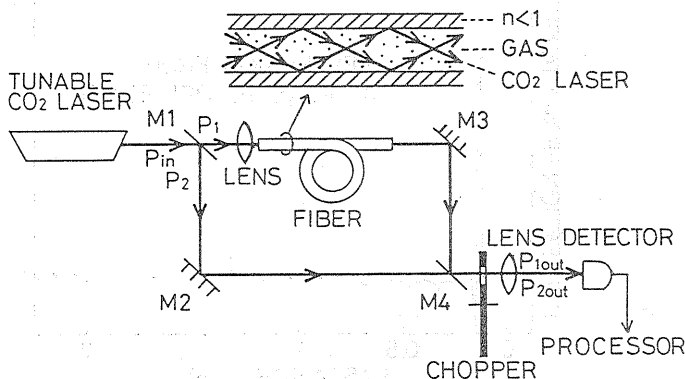


図1 計測システムの基本構成図

ようになる。

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{det}} = \frac{P}{\Delta P} = \frac{P}{NEP \cdot \sqrt{B}} \quad (5)$$

P は検出器への入射パワー [W], ΔP は P の誤差, NEP は検出器の雑音等価指数, B は測定系の帯域幅 [Hz]である。④式と⑤式を組み合わせると最小検出濃度 \bar{N}_{min} は⑥式ようになる。

$$\bar{N}_{\text{min}} = \left(\frac{S}{N}\right)_{\text{min}} \cdot \frac{1}{\sigma L \sqrt{NEP^2 \cdot B \cdot \left\{ \left(\frac{1}{P_{\text{out}}}\right)^2 + \left(\frac{1}{P_{\text{zout}}}\right)^2 \right\}}} \quad (6)$$

ボックスカー積分器等を使用した場合には積算時間による S/N 改善率 A を付け加えて

$$\bar{N}_{\text{min}} = \frac{1}{A} \cdot \left(\frac{S}{N}\right)_{\text{min}} \cdot \frac{1}{\sigma L \sqrt{NEP^2 \cdot B \cdot \left\{ \left(\frac{1}{P_{\text{out}}}\right)^2 + \left(\frac{1}{P_{\text{zout}}}\right)^2 \right\}}} \quad (7)$$

となる。但し以上の計算においては σ , L , T_F に誤差は含まないものとした。

4 計算結果

⑥式および⑦式に基づいて、最小検出濃度の計算を行った。計算に使用した主なパラメータを表1にまとめて示す。測定気体として NH_3 を考えた場合 (10.6 μm 近辺に吸収をもつ物質として NH_3 の他にも C_2H_4 , CF_2CO_2 , O_3 等が興味深い) のファイバの長さに対する最小検出濃度の計算結果を図2に示す。ファイバの損失をパラメータによって変化を調べた。表1以外で使用した値は次の通りである。 $S/N = 1$, $B = 1$ [Hz], $T_1 = 0.6$, $T_4 = 0.3$, 積算時間は考えていない。ファイバの損失が小さくなるにつれて、いわゆる長光路の効果が出てくる。理論的最小損失の 0.42 dB/m (ファイバ内径 0.6 mm 中において)

表1 計算に用いた主なパラメータ

Fiber	Hollow-Core Fiber Loss : 6dB/m (Experimental Data) 0.42dB/m (Theoretical Data)
Laser	CO_2 Laser Wavelength: 10.6 μm Power : 100mW
Detector	Pyroelectric IR Detector NEP : $1.1 \times 10^{-9} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ (10.6 μm , 10Hz, 1HzBW)
Gas	NH_3 Absorption Cross Section: $96 \times 10^{-22} \text{ m}^2$

を例にとると、ファイバ長が 15m では、最小検出濃度は 5×10^{-8} ppm となる。15m 以上ではファイバ損失が支配的になるためファイバ長が長くなるほど最小検出濃度は悪くなる。また現在使用に供されるファイバは損失が 6 dB/m と非常に大きいので、ほとんど長光路吸収の効果が表われない。しかし 5m の長さで、 2.5×10^{-6} ppm 程度の濃度を測定できる。

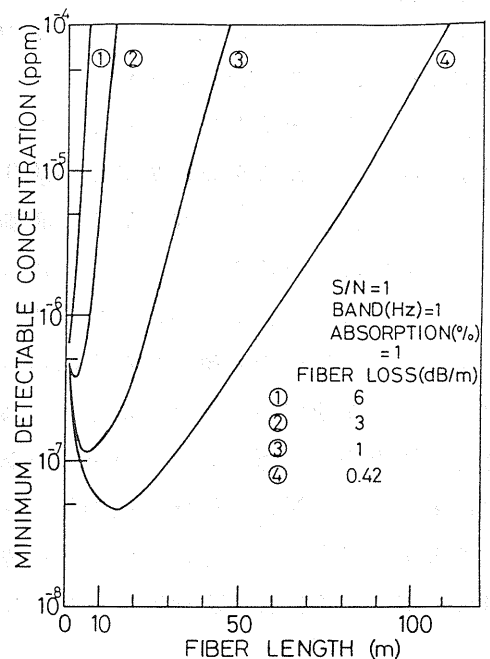


図2 最小検出濃度のファイバ長依存性

5 おわりに

新しく開発された CO_2 用中空ファイバの長光路吸収計測への応用を提案し、理論的に検討を行った。その結果、ファイバの損失が多少大きい状態でも、5m の長さで 2.5 ppt 程度の濃度は検出可能であることがわかった。今後は実験的に検討を行い、計測システムの具体化を進めていくつもりである。

謝辞 中空ファイバの使用にあたり、便宜を計って頂いている、電総研、日高建彦氏に感謝いたします。

参考文献 1) T. Hidaka et al., J. Appl. Phys. 53, (1982), 5484. 2) 宮城 他, 信学技報 OQE 82-120 (1983). 3) 青藤 他, 444 回応用物理学会予稿集, 272-S-10 (1983).