

〔論文〕

# 汚染物質濃度から算出する排ガス量の簡易推算法

高山 敦好<sup>\*1</sup>・室屋 佑成<sup>\*2</sup>

## A Simple Method of Estimating the Amount of Exhaust Gas by Measuring Emission Concentrations

Atsuyoshi TAKAYAMA<sup>\*1</sup>, Yusei MUROYA<sup>\*2</sup>

### Abstract

In recent years, due to the environmental pollution caused by diesel exhaust gas and heavy oil combustion, emission regulations have become strict. This includes regulations on contaminants in exhaust gas discharged from an engine or a boiler, which is measured according to the amount of discharge per kilowatt hours (g/kWh). Hence, to meet the regulations, it is essential to measure the amount of exhaust gas, which is related to the amount of soot in an exhaust gas. This study estimates the amount of exhaust gas by measuring exhaust gas concentrations (O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, and SO<sub>2</sub>). Oxygen was supplied to the exhaust gas, and the amount of exhaust gas was estimated from the increase in oxygen concentration. In this study, a specific amount of exhaust gas determined by measuring fuel consumption and the amount of air inhaled has been set as the standard amount of exhaust gas. The amount of gas exhaustion caused due to fuel consumption and CO and CO<sub>2</sub> concentrations increased, whereas that due to SO<sub>2</sub> concentration decreased. The amount of gas exhaustion determined using a Pitot tube or by oxygen mixing was in good agreement with the determined standard amount of exhaust gas.

**Key Words** : Mount of Exhaust Gas, g/kWh, Exhaust Gas Concentration (O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>), Fuel Consumption, Amount of Inhaled Air

### 1. 緒 論

環境問題が深刻化し、陸上排出源の排出規制から始まり、海上排出源の排出規制の強化が進んでいる<sup>1), 2), 3), 4)</sup>。ポスト新長期規制やユーロVI等の自動車における規制では、単位出力当たりの排ガス中の汚染物質濃度 (g/kWh) や km 当たりの汚染物質濃度 (g/km) が一般的である。また、船舶では国際海事機関 (IMO : International Maritime Organization) により、規制海域 (ECA : Emission Control Area) にて2016年から IMO 3次規制が施行されており、回転数に応じた規制として単位出力当たりの排出量 (g/kWh) で規制されている。通常、排ガス測定器の計測は、単位体積当たりの割合 (ppm) であり、排ガスを試算し換算する必要がある。

排ガス量の測定<sup>5), 6), 7), 8)</sup>は、燃料消費量と吸入空気量から算出されるのが一般的である。吸入空気量の算出は、ピトー管で計測することが可能であるが、取り付けの加工が必要である。ピトー管であれば、直接排ガスを計測することが可能であるが、排ガス中の汚染物質や煤の影響だけでなく脈動の影響が懸念される。また、レーザを用いた全量測定が挙げられるが、既存のエンジンを大幅に加工する必要があり、非常に高価である。排ガス測定器による推定が簡易であるが、これは排ガス中の酸素濃度から算出する空気過剰率 $\lambda$ を用いたものであり、誤差が非常に大きいものと推測される。これらから、排ガス量の算出には弊害が多く、簡易的な推定法の開発が必要であると言える。

本研究は、排ガス中の汚染物質濃度の測定から排ガス量の推算を試みたものである。これは、SO<sub>2</sub>濃度から算出する手法、CO、CO<sub>2</sub>濃度から算出する手法が考えられる。また、排気煙道内に酸素を供給し、酸素濃度の増加量から排ガス量の推算を試みたものである。比較対象として、ピトー管による吸気流量から算出した排ガスを基準とした。

\*1 機械システム工学科

\*2 エネルギーシステム工学専攻

平成29年10月31日受理

## 2. 実験手法

### 2・1 単位換算

#### 2・1・1 記号

$Hl$  : 低位発熱量 (MJ/kg)

$Hh$  : 高発熱量 (MJ/kg)

$h, w$  : 燃料中の水素および水の含有割合 (%wt)

$A_0$  : 理論空気量 (m<sup>3</sup>/kg)

$G_0$  : 理論燃焼ガス量 (m<sup>3</sup>/kg)

$\lambda$  : 空気過剰率

$O_{ex}$  : 排ガス中の酸素濃度 (%)

$G$  : 排ガス量 (m<sup>3</sup>/h)

$W$  : 燃料消費量 (kg/h)

$CO, CO_2$  : 排ガス濃度 (ppm\*10<sup>-6</sup>, %\*10<sup>-2</sup>)

$E_S$  : 排ガス中のSO<sub>2</sub>の排出量 (m<sup>3</sup>/h)

$s$  : 燃料中の硫黄分量 (kg/h)

$P$  : 気圧 (Pa)

$T$  : 温度 (°C)

$O_{2ex}$  : 未処理の排ガス中の酸素濃度 (%)

$O_{2air}$  : 酸素供給後の排ガス中の酸素濃度 (%)

$O_{2in}$  : 供給させた酸素量 (L/h)

$v$  : 排ガス中の流速 (m/s)

$A$  : 排気煙道の断面積 (m<sup>2</sup>)

$w$  : 排気補正

$E_o$  : 排気弁開 (°)

$E_c$  : 排気弁閉 (°)

$Q$  : 単位時間出力当たりの排出量 (g/kWh)

$M$  : 各汚染物質の物質質量 (g/mol)

$C$  : 窒素酸化物の換算濃度 (ppm)

$C_S$  : 排ガス中の窒素酸化物濃度 (ppm)

$O_n$  : 換算酸素濃度 (%)  $W$  : 出力 (kW)

$PS$  : 馬力 (ps)

$LR$  : 負荷率 (%)

#### 2・1・2 従来の換算式

排ガス中の汚染物質の濃度は、表1に示すように、使用する機器によって各酸素濃度による換算が必要である。式(1)で求められている。燃焼装置に応じた換算酸素濃度と排出基準を表1に示す<sup>9)</sup>。これは、一定の濃度に酸素濃度を換算することで同一条件とし、規制値に対し不正を防ぐ目的がある。

$$C = \frac{21 - O_n}{21 - O_{ex}} \times C_S \tag{1}$$

Table 1 Corresponding Value of Oxygen Concentration

	Corresponding Value of Oxygen Concentration (%)	Emission Standard (ppm)
Gas Turbine	16	70
Diesel Engine	13	950 - 1200
combustion furnace of Dust	12	250
Boiler of Solid Fuel	6	200 - 300
Boiler of Liquid Fuel	4	130 - 180

### 2・1・3 排ガス量の算出法

①燃料消費量から算出；燃料性状のうち、高発熱量、水素分、水分から式(2)に示す低位発熱量  $HI$  が求められることができ、式(3)で理論空気量  $A_0$ 、式(4)で理論燃焼ガス量  $G_0$ 、式(5)で空気過剰率  $\lambda$  が求まる。これらから式(6)で排出ガス量  $G$  が求まる。

②吸入空気量と燃料消費量から算出；吸入空気量と燃料消費量から算出を測定することで、その合計が排ガス量となる。吸入空気量の計測は、空気の流量を測定することから、異物混入による影響が回避でき、測定が容易である。これらから容易に排ガス量を算出できる。吸入空気量の計測は、ピトー管を用いた。

③ピトー管から算出；ピトー管は、差圧を用い管内の流速を求めることが可能である。排ガス量は、式(7)で求めることが可能である。排気煙道内にピトー管を設置することで、流速と排気煙道の断面積から排ガス量を求める。ピトー管の差圧から流速を算出することで排ガスの脈動が懸念されるが、装置の応答性から平均流速が表示されるものと仮定した。また、排ガス量は、排気弁が2回転につき1回開閉することから式(8)による補正を行った。

④排ガスに酸素混入して濃度差から算出；酸素ボンベ中の酸素濃度が約100%とすると、式(9)により、排ガス量が算出できるものと定義する。

⑤CO および CO<sub>2</sub>濃度が算出；CO および CO<sub>2</sub>濃度から式(10)で排ガス量  $G$  が算出できる。これはカーボン法と言われている。

⑥燃料油中の硫黄分濃度から算出；燃料油中の硫黄分の割合から、式(11)で SO<sub>2</sub>の排出量  $E_s$  が求まる。次に、排ガス測定器で測定される濃度は ppm であり、排ガス中の体積に対する割合であることから、式(12)で排ガス量  $G$  が推算できると定義する。

$$HI = Hh - 2.512 \times \frac{(9h + w)}{100} \quad (2)$$

$$A_0 = 0.203 \times HI + 2.0 \quad (3)$$

$$G_0 = 0.265 \times HI \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{20.9}{20.9 - O_{ex}} \quad (5)$$

$$G = W[(G_0 + (\lambda - 1)A_0)] \quad (6)$$

$$G = v \times A \times w \quad (7)$$

$$w = \frac{E_0 - E_c}{720^\circ} \quad (8)$$

$$G = \frac{(100 - O_{2air})}{(O_{2air} - O_{2ex})} \times O_{2in} \quad (9)$$

$$G = \frac{1.87c}{(CO + CO_2)} + 11.2h + 1.24w \quad (10)$$

$$E_s = \frac{22.4}{32} \times s \quad (11)$$

$$G = \frac{E_s}{E_{SO_2} \times 10^{-6}} \quad (12)$$

### 2・2 単位出力時間当たりの排ガス量 (g/kWh)

式(13)に示すように、排ガス量から汚染物質の濃度から単位出力時間の排出量が算出できる。出力は、式(14)に示すように、馬力と負荷率から出力を求める。

$$Q = \frac{G \times E \times 10^{-6}}{22.4 \times 10^{-3}} \times M \quad (13)$$

$$W = PS \times 0.7355 \times \frac{LR}{100} \quad (14)$$

### 2・3 実験装置

エンジンの諸元を表2に示す。クボタ製4サイクルディーゼルエンジン（型式：EA14-NB）で、最高出力が8.45kW／2600rpmである。ボアが94mm、ストロークが90mmであり、排気量624ccの1気筒である。はじめに、各出力(kW)の燃料消費量および吸入酸素量を測定し、排ガス量を算出する。負荷率は25% (2.15kW), 50% (4.3kW), 75% (6.45kW) である。

排ガス量の算出は、排ガス濃度を測定し、式(8)～式(10)で求めた。排ガス濃度計はテスト社製 testo350を用い、O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> (%), NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO (ppm) が計測可能である。

次に、エンジン排気直後に酸素を供給し、その後の排気煙道上に排ガス濃度計で採取し、排ガス中の酸素濃度の増加から、式(10)にて排ガス量を試算した。

燃料の性状を表3に示す。使用した燃料はA重油であり、硫黄分濃度が0.74%である。低位発熱量は42.17MJである。

Table 2 Engine Information

Engine	EA14-NB
type	Direct Ignition
Cylinder	1
Displacement	624cc
Bore× Stroke	94mm×90mm
Power	8.45kW/2600rpm
Dynamo	36.8kW/6000rpm
Fuel	Right Oil
Load	25%, 50%, 75%

Table 3 Fuel Characters

	Right Oil
Density (g/cm <sup>3</sup> ) (15°C)	0.8716
Flashing Temperature (°C)	82.5
Kinetic Viscosity (mm <sup>2</sup> /S) (50°C)	2.587
Water Content (%)	0.00
Carbon Residue Content (%)	0.38
Ash Content (%)	0.000
Sulfur Content (%)	0.74
Nitrogen Content (%)	0.01
Total Low Heat Value (KJ/kg)	42170

## 3. 実験結果

### 3・1 エンジンの測定

図1にエンジンの測定結果を示す。a) が生データで、b) が酸素濃度13%換算結果である。a) の生データの実験結果を見てみると、出力が増大するにつれて、NO<sub>x</sub>濃度が上昇する傾向があった。また、不完全燃焼を把握するうえで重要なCO濃度は高負荷になるにつれて低減されていることから、高負荷時の燃焼性が良好であり、NO<sub>x</sub>濃度が上昇したものと言える。b) の酸素濃度13%換算による計算結果を見てみると、NO<sub>x</sub>濃度の上昇の傾きがやや緩くなった。また、SO<sub>2</sub>濃度は負荷が増大するにつれて低減された。CO濃度はやや傾きが小さくなる傾向が見られたが、CO<sub>2</sub>濃度がほぼ一定となった。これらから、本ディーゼル機関においては、ppmでの排ガス規制を検討することで低負荷が優位にあると言える。

3・2 排ガス量の算出

3・2・1 燃料消費量から算出

燃料消費量および酸素濃度から算出した排ガス量を表4に示す。回転数は2600rpmである。燃料消費量は、負荷が増加するにつれて増加し、酸素濃度は、負荷が増加することで大きく減少したことから燃焼性が良好にあると言える。これらから、排ガス量を算出したところ、負荷による排ガス量の変化はほぼ見られなかった。

3・2・2 燃料消費量と吸入空気量から算出

表4に示すように、燃料消費量と吸入空気量から算出した排ガス量では、負荷の増加に対しやや右上がりの傾向があった。吸入空気量は、回転数が2600rpmすなわち1300回/min吸気を行うことから、最大でも811.2L/minである。吸入空気量から充填効率が約58.7-62.7%であり、この排ガス量を基準値と仮定した。

3・2・3 各手法による排ガス量推算の比較

各手法による排ガス量の比較を図2に示す。基準である燃料消費量と吸入空気量から推算した排ガス量に対し、ピトー管および酸素混合による算出手法が近似できている。しかしながら、CO濃度とCO<sub>2</sub>濃度から推算した排ガス量や燃料消費量から推算した排ガス量はやや多い傾向にあった。さらに、SO<sub>2</sub>濃度から推算した排ガス量はやや低い傾向があった。よって、酸素混入による排ガス量から、各汚染物質の排出量を試算した結果を図3に示す。

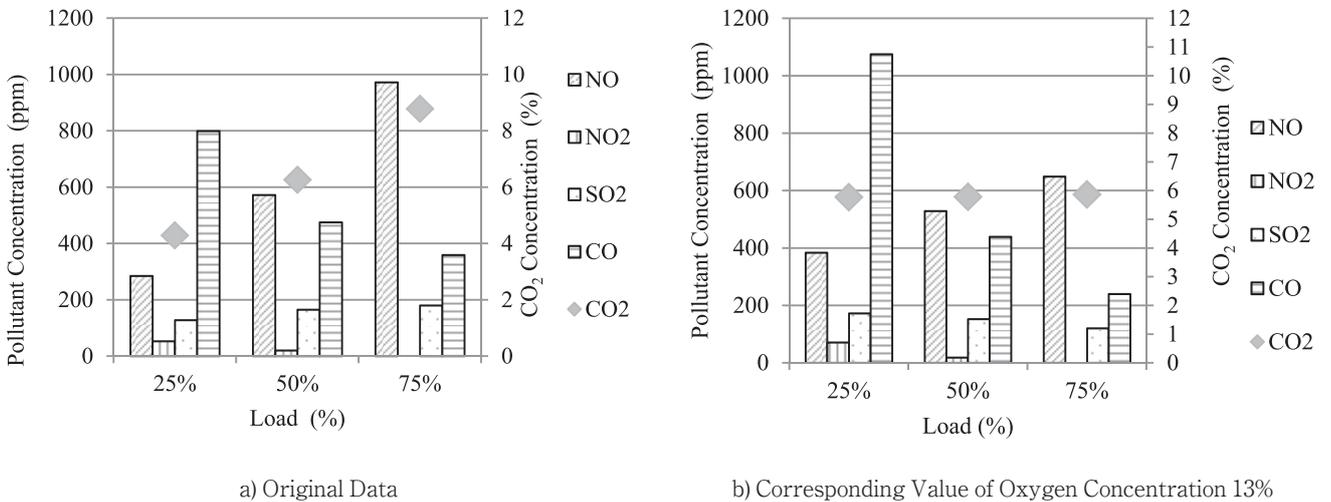


Fig. 1 Result of Emission

Table 4 Amount of Exhaust Gas

Load	Fuel Consumption				Fuel consumption and amount of suction air		
	Fuel Consumption (kg/h)	Oxygen Concentration (%)	Air excess ratio: $\lambda$	Amount of Exhaust Gas (L/min)	Fuel Consumption (L/min)	amount of suction air (L/min)	Amount of Exhaust Gas (L/min)
25%	0.950	15.03	3.56	576.3	18.2	476.4	494.6
50%	1.290	12.35	2.44	568.1	24.7	491.3	516.0
75%	1.809	9.07	1.77	581.1	34.6	508.6	543.2

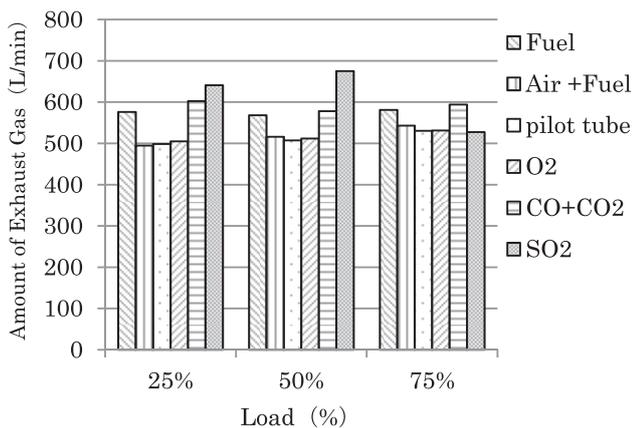


Fig. 2 Relation of Exhaust Gas Amount

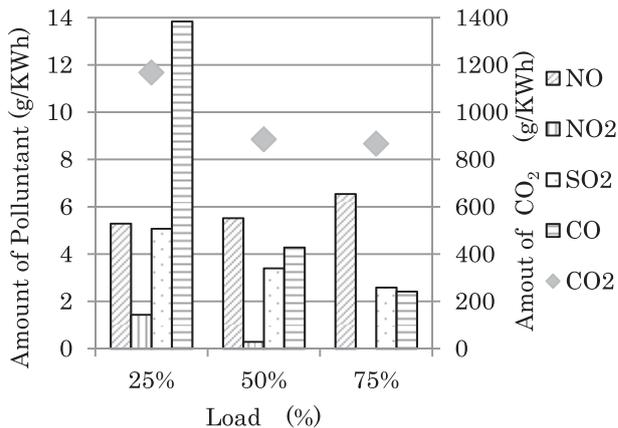


Fig. 3 Amount of Pollutant

### 3・3 考察

一般的に、燃料消費量と吸入空気量の総量をもって、排ガス量が算出されていることからこの数値を基準排ガス量としたが、ピトー管や酸素混入法では、この数値と同等の数値を示した。しかしながら、有効であるカーボンバランス法では、高い値を示した。その他、燃料消費量から直接算出する手法やSO<sub>2</sub>濃度から算出する手法でも同様に高い値を示した。これらの高い数値の原因は、本研究において温度補正や圧力補正を用いなかったことが要因であると考えられる。これは、現場で測定する際に補正が多いことが計算ミスを招く原因となり、かつ排ガス中の汚染物質濃度からのみで算出する簡易測定法としての意味が失われないようにすることを第一目的としたことが要因である。以上から、酸素混入による測定法は酸素ガスボンベと酸素濃度計測装置があれば排ガス濃度の算出が可能であり、だれでも容易に計測できるものであると言える。

## 4. 結 論

本研究は、排ガスの濃度を計測することで排ガス量を推算することを目的とした。また、酸素を混入することで、その濃度差から排ガス量を算出したものであり、以下の結論を得た。

1. 燃料消費量および吸入空気量から算出した排ガス量は、排ガス中にピトー管を直接用い算出した排ガス量に一致した。
2. 酸素を混入し酸素濃度から推算する手法は、燃料消費量および吸入空気量から推算した排ガス量に一致した。
3. COおよびCO<sub>2</sub>の濃度を計測したカーボン法では排ガス量が高い傾向にあり、SO<sub>2</sub>から推算した排ガス量はやや低い傾向にあった。

## 文 献

- (1) 石井素, 自動車の排出ガス規制等の動向, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol. 47, No. 6 (2012), pp. 52-57.
- (2) 松本友宏, NO<sub>x</sub> 3次規制に関する国際的動向—IMOにおける論議—, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol. 48, No. 6, pp. 2-4 (2013).
- (3) 松本友宏, IMO 第66回海洋環境保護委員会 (MEPC66) の開催結果—NO<sub>x</sub> 3次規制, SO<sub>x</sub> 規制 (燃料油中の硫黄分濃度) について—, 海洋水産エンジニアリング, Vol. 14, No. 116 (2014), 127-130.
- (4) 村上浩一, 芳賀一郎, 中村英男, 国内の排出ガス規制動向, Vol. 19, No. 5 (2005), pp. 51-56.
- (5) 後藤雄一, 超低公害自動車用次世代排ガス計測システムの開発に関する研究, 交通安全環境研究所, No. 34 (2001), pp. 1-5.
- (6) 中川智史, 横田久司, 古明地哲人, 三好康彦, ディーゼル排ガス簡易測定方法の基礎的検討, 東京都環境科学研究所年報, pp. 112-117 (2003).
- (7) 芳賀一郎, 村上浩一, 中村英男, 前橋心一, ディーゼル車両の排ガス測定・評価手法の開発, 鉄道総研報告, Vol. 23, No. 4 (2009), pp. 35-40.
- (8) 水谷幸夫, 燃焼工学第3版, 森北出版株式会社 (2002), pp. 44.
- (9) 環境省: ばいじんとNO<sub>x</sub>の排出基準値一覧, 平成29年10月31日参照, <http://www.env.go.jp/air/osen/law/t-kise-6.html>