

研究

火炎色光検知による光ファイバー式空気比センサー — 実用化と空気比制御による性能評価 —

山口 貴弘*・山田 朝治**・内山 寛信**

* 関西大学大学院工学研究科, ** 関西大学工学部機械工学科 〒564 吹田市山手町 3-3-35

(1995年5月29日受付, 1995年7月17日受理)

Development of Practical Fiber-Optic Air-Ratio Sensor by Detecting Flame Colors: Practical Application and Performance Inspection under Air-Ratio Control Behavior

Takahiro YAMAGUCHI,* Tomoharu YAMADA** and Hironobu UCHIYAMA**

* Graduate School of Kansai University, ** Department of Mechanical Engineering,
Faculty of Engineering, Kansai University, 3-3-35, Yamate-cho, Suita 564

(Received May 29, 1995; Accepted July 17, 1995)

On a gas boiler with a multi-port premix burner, the fuel-lean combustion method is effective to reduce the NO_x emission and the heat loss and to design a small furnace, and hence it has been desired for the practical use. However, to adjust the heat load continuously with these advantages, the air-ratio must be controlled properly. Most of the air-ratio sensors that have been studied for the last few decades aren't suitable for a small boiler in the cost-performance or the enduring reliability. In this paper, a practical air-ratio sensor is proposed that measures the air-ratio with the color signals including the radical emissions. Also the following investigations are reported: (1) the relationship between the color signal and the emission, or the air-ratio, (2) the construction of the fiber sensor, and (3) the substantiation of its usefulness in the applications to an actual boiler. These results guarantee the industrial usefulness of the proposed method.

1. はじめに

希薄燃料の燃焼が可能である予混合式ガスボイラーは、 NO_x 排出量の低減化¹⁾が図れ、過剰空気量の調整により熱効率の向上も期待できる。また、多炎孔型板状バーナー²⁾の実装により、火炎長の短縮化による高負荷燃焼の実現とボイラーの小型化、広範な熱負荷に対する運転も可能となる。構成要素の特質を有効に活用し、さらに連続的な熱負荷制御時にも環境に対する良好な性能を保持する燃焼状態を維持するためには、実用的な空気比の検知法を確立し、制御系を構築する必要がある。

大熱容量ボイラーや焼却プラントでは画像計測法³⁾や分光計測法⁴⁾など、汎用的なボイラー用では電極式イオン電流検知法⁵⁾、赤外線ガス発光計測法⁶⁾、カラー TV

カメラによる分光法⁷⁾、火炎の色光変化⁸⁾による燃焼状態の監視あるいは空気比検知の研究がなされている。

これらの手法を比較的安価な産業・業務用の小型ガスボイラーに適用する際には、性能・価格比、経済性⁹⁾、経時的な特性変化、機器の占有容積などの実用上の評価より、現況では良好な整合性をもつ空気比検知センサーの選定が困難である。

本報告では予混合式・小型ガスボイラーへの実装を目的として、安価で保守の容易な光ファイバー式空気比検知センサーを試作し、実用化を促進する一助とする。提案する検知器系は、センサー部に大開口数のプラスチック製ファイバーを採用し、火炎光を集光・伝送する。その後、ガラスフィルターを用いて CH と C_2 のラジカル自発光を含む青と緑の火炎色光成分を分離し、GaAsP

フォトダイオードで光電変換する。この両信号比¹⁾と実空気比を比較し、検知信号を較正する手法である。

この検知器系を構築するため、多炎孔型バーナー面上の火炎形状、燃焼条件による火炎色光の挙動などの基礎的な特性を解明し、センサーの設計条件を明確にする。ファイバーの受光特性の解析結果より、センサーの構成と設置位置を決定する。センサー性能は、ラジカル自発光と自発光成分を含む色光の両信号を用いた場合について比較・評価するとともに、その有効性を実機ボイラーの空気比制御により検証する。

2. ボイラーと燃焼火炎の基礎的特性

2.1 ボイラーの構造と NO_x 排出特性

Fig. 1 に示す供試ボイラーは、産業・業務用の予混合燃焼式温水ボイラーであり、最大の入力熱量 Q が 125 MJ/h の小型モデルである。入力熱量は供給ガスが完全燃焼した際の発熱量で定義する。ボイラーには、バーナー(125×55×13 mm の板状セラミック材に ϕ 1.2, 1.3, 1.9 mm の 3 種類の炎孔が 3.4 mm の間隔で千鳥状に全面に配列)が装備されている。バーナーの概略的な形状は Fig. 9 に示す。比例弁により流量 q が調整された燃料ガスである都市ガス 13A は、多翼ファン式ミキサーで燃焼用空気と均質に混合¹⁰⁾され、風箱、バーナー部を介して燃焼室に送出される。供給ガスに混合する空気量 v は、ファンの吸込み空気量をモーターの回転速度 n により制御する。混合気はバーナー上面にほぼ密着した短火炎長の炎群を形成し燃焼する。

供試ボイラーの NO_x, CO 排出濃度と空気比 m , 入力熱量 Q の関係を Fig. 2 に示す。空気比 m は磁気風式

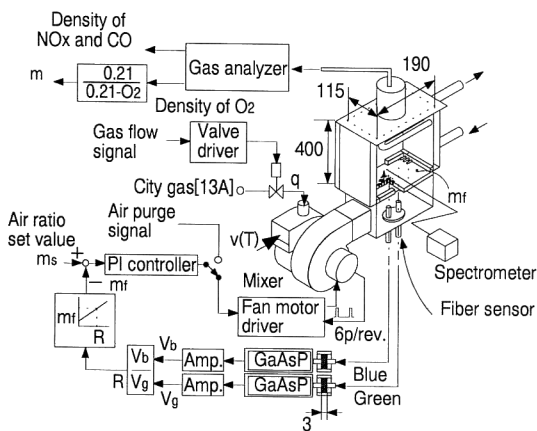


Fig. 1 Schematic diagram of testing gas boiler with air-ratio control system.

酸素濃度計を用いて定常燃焼時の排出酸素濃度を計測し、その平均値より算出している。多炎孔型バーナーを用いた予混合燃焼では、 $m \geq 1.15 \sim 1.25$ 近傍において NO_x 排出濃度が 60 ppm 以下となり、CO 排出濃度は $m < 1.15$ 近傍で急激に増大する。これより、本ボイラー系において有害物質の排出量と熱損失の低減化を実現するには、空気比を $m_s = 1.25$ の近傍値で運転制御することが望ましい。

2.2 空気比と火炎の性状

供試ボイラーを用いて燃焼火炎の基礎的な性状を実験的に解析する。燃焼室の側面に設けた 120×15 mm の石英ガラスの窓を介して観測した火炎光を、 $\lambda = 200 \sim 1000$ nm の波長域において分光分析した結果が Fig. 3 である。分光光学系は集光レンズが前段 $f = 70$ mm, 後段 $f = 50$ mm であり、焦点位置に機械式チョッパーが

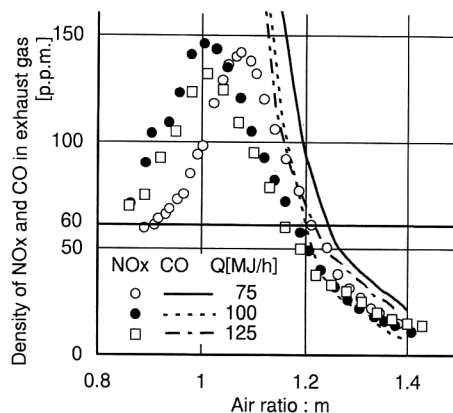


Fig. 2 Relationship between air-ratio and density of NO_x and CO in the exhaust gas.

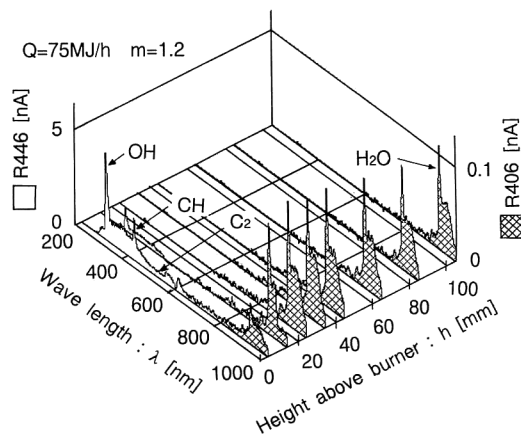


Fig. 3 Spectroscopy of flame emission.

設置されている。回折格子分光器は日本分光製のCT-10であり、格子刻線本数は600本/mm、光電子倍增管はR446とR406である。分析は代表火炎の中心軸に沿って行い、観測する火炎部位のバーナー上面からの高さ h に対するスペクトル分布の推移状態図として示す。分析時には、缶体内で赤熱する石綿シール材などの擾乱的な背景光は、可能な範囲で排除している。本バーナーでは、 $\lambda < 600$ nmのOH, CH, C_2 のラジカル自発光の分布特性より、 $h < 20$ mmに火炎の反応領域が存在し、 $h > 20$ mmでは中心波長が900 nm近傍値の H_2O ガス発光の成分が増大する特性をもつ。

火炎の色光強度とその分布状態を、観測用の石英窓を介して得た、 $F=1.4$, $f=16$ mmであるカラーCCD (charge coupled device)カメラの青と緑画像素子(以後、B, G素子と記述する)信号を用いて検討する。B素子の特性は最大感度波長が460 nm、感度波長範囲が390~520 nmで、G素子は530 nm, 480~600 nmである。この領域には、波長が431.5 nm, 516.0 nmのCH, C_2 のラジカル自発光成分が含まれる。Fig. 4(a)はB素子、(b)はG素子信号を画像メモリーを用いて処理し、火炎形状を等受光強度曲線群により示した一例である。最大強度値の10等分割線で示される火炎色光の強度分布模様は、Fig. 3の特性と同様に、CH, C_2 のラジカル光成分が存在する $h < 20$ mmの領域に作図される。両図の模様はよく類似した形状を示し、各炎孔軸に対してほぼ対称形となっている。これよりバーナー面において均一な燃焼反応が保持され、安定した火炎群を形成していることが確認される。

代表火炎とする $\phi 1.9$ mmの炎孔軸上にある素子信号を用いた色光の強度特性がFig. 5である。 V_B , V_G 信号はB, G素子の受光強度を、標準的な運転状態である入力熱量75 MJ/h, 空気比 $m=1.2$ の場合のB素子の最大受光強度で除した相対的な値である。(a)は空気比 m 、(b)は入力熱量 Q がパラメーターである。両信号はバーナー面に近接する $h=3\sim 4$ mmの位置で最大値を示す。信号強度は m にほぼ逆比例して減少し、 Q にほぼ比例して増大する。

両図には、 V_B , V_G 信号が十分に大きいとみなせる $h \leq 10$ mmの領域では $r = V_B/V_G$ 値を示す。 Q が一定の場合には r 値はほぼ相似的な曲線形状となる。そして、 m の増大に伴い信号レベルは増加し、火炎色は相対的に緑色より青色が強い状態へ移行する。 m が一定の場合には、 r 値は Q の影響を大きく受けず、ほぼ同一の曲線形状となる。火炎の下部から上部に向かって、火炎

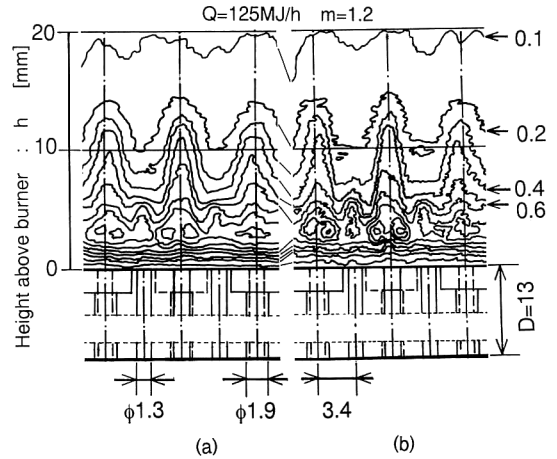


Fig. 4 Intensity distribution of flame emission detected with color CCD camera. (a) Blue color V_B and (b) green color V_G .

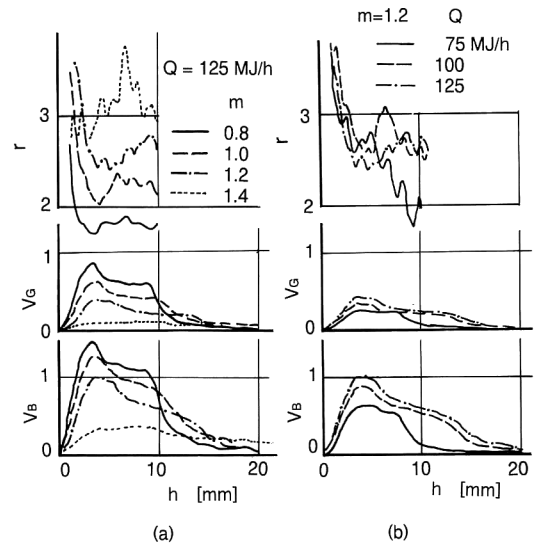
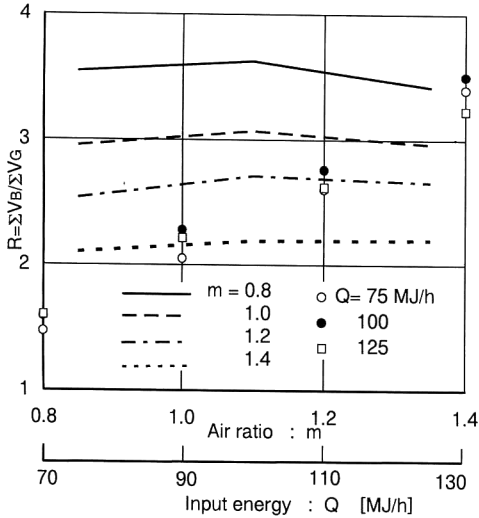


Fig. 5 Intensity distribution of color signals as parameters of (a) m and (b) Q .

色は青色に比べ緑色成分が増大することがわかる。

観測用窓の全横幅15 mm域内にあるB, G素子信号量の総和比より求めた平均的な色光比 $R (= \sum V_B / \sum V_G)$ と空気比 m , 入力熱量 Q の関係をFig. 6に示す。 R は炎孔軸上の特性と同様に Q に依存せず、 m にほぼ比例して増大する。これにより、CH, C_2 ラジカルの自発光強度が m に依存して変化する挙動を、広帯域の色光信号より抽出できることが検証できる。

Fig. 6 Variation of R with m and Q .

3. ファイバー式空気比検知センサー

3.1 センサー系の設計指針と構成

火炎の微弱な色光信号の比より、燃焼火炎部の空気比を検知する計測系を構成する際には、前節で得た知見を含め、供試ボイラー系の場合では、

- バーナー面から $h < 20$ mm の領域にある火炎群光より、青、緑の色光成分を検知する。
- 発光強度の偏りの平滑化と SN 比の向上のため、火炎色光の空間的な平均値を検知する。
- バーナー面、石綿シール材の赤熱による擾乱的な熱放射を遮光する方策を施す。
- センサー端を火炎からの放射熱より保護する。
- 微弱光信号を低雑音で伝送後、他信号も含めて集中的に処理し、計装系の簡素化を図る。
- 低価格で小型・堅牢な信号処理系とする。

などの事項を考慮する必要がある。

センサー系の構成と設置状態を Fig. 1 に示す。センサー部には開口数が 0.5, $\phi 0.75$ mm, 長さ約 1000 mm の柔軟性に富むプラスチックファイバーを用いる。ファイバーの伝送損失特性を Fig. 7 に示す。損失は 300~650 nm の観測波長領域で 0.7~0.05 dB/m であり、1 m 程度の伝送距離では十分に小さい。また、急峻な特性変化がないため、色光検知信号は色相が大きく変化することなく伝送されると考えられる。センサー端は 14 本のファイバーが $\phi 2.6$ mm の金属柱の外周に単列で配置され、 $\phi 5$ mm \times 50 mm 管で保護されている。概略を Fig. 9 に付記する。センサーの受光面がバーナー下

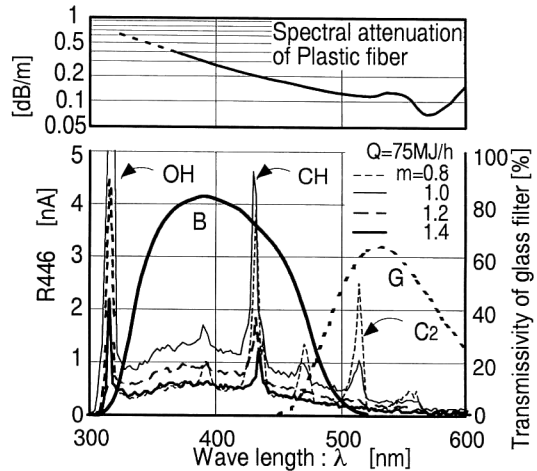


Fig. 7 Optical characteristics of plastic fiber, glass filters and radical emissions.

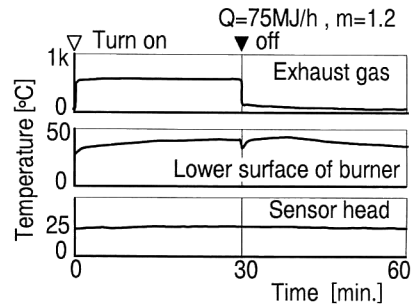


Fig. 8 Variation of temperature on fiber sensor and boiler system.

面から $L = 70$ mm の距離で、光軸中心が炎孔軸と平行に風箱底部に固定される。このセンサー形状と設置条件により、炎孔径の配列順位により多少の差異が生じるが、バーナー面の直上で最大 $\phi 27$ mm 程度の領域にある火炎光が受光される。このとき、センサーは火炎光をバーナーの炎孔を介して受光するため燃焼室から隔離され、熱的に保護される。さらに、混合気の流れによる除熱効果も望め、特別な冷却・保護機構は不要となる。ボイラー運転時のセンサー上端部、バーナー下面部、および排気ガス温度の変動状態を Fig. 8 に示す。点火後、 $Q = 75$ MJ/h, $m = 1.2$ の条件下で 30 分間の定常燃焼を行い、消火後 30 分間放置する運転経過である。バーナー下面の温度は、点火、消火動作に対して大きな遅れを伴う応答を示し 40°C 近辺で変動するが、ファイバー先端部は室温状態の 25°C を保持することが確認できる。また、バーナー上面の赤熱による熱放射光は缶体壁から

の反射を除き、センサー端への直接光の影響は激減する。

ファイバーは、視野域内における受光部位の均等化を図るため、奇数・偶数の配列順位に2分し、後端部はプラグ部に固定される。途中の伝送経路は、遮光と保護のためビニール被覆されている。コネクタ部に伝送された光信号は狭帯域干渉フィルターに比べて低価格で、小型化できる3mm厚の赤吸収用青紫色と緑色のガラスフィルターに入光する。フィルターに密着した感度波長範囲が300~680nm、最大感度波長が610nmのGaAsPフォトダイオードで光電変換される。両信号は初段で1GΩの帰還抵抗を用いた電流・電圧変換後、250倍の電圧増幅をしている。この青、緑色波長帯の火炎信号成分 V_b 、 V_g より、色光比信号 $R = V_b/V_g$ が算出される。そして、 R 値は実空気比 m との較正曲線に従い、スケール変換される。フィルターの光学的特性をFig.7に示す。なお、TVカメラのB素子の感度特性に比べ、青紫色フィルターの最大感度波長はCHラジカル波長の近傍にあり、検出感度が向上する。

Fig.1に示す信号処理系は、空気比の算出と制御、ならびに供給ガス量の調整、諸データの収集・記録と解析とを同時に行うため、計算機を用いた構成にしてある。これらは集積回路などによる実用的な信号処理系に簡単に置換できる。

3.2 センサーの受光特性

バーナー上面から上方20mm程度までの空間部で発生する火炎光を下面から距離 L に設置したセンサーで検知する際の受光特性を、単ファイバーの場合について検討する。ファイバーの中心軸と炎孔の中心軸は合致し、ファイバーの臨界入射角以内で炎孔を通過する火炎光はO点に集光する。各炎孔上の層流予混合火炎¹¹⁾は円錐体状モデルとし、表皮部で燃焼する仮想の微細火炎粒子は全方位に等強度で光を放つと仮定する。円錐体の底円直径はバーナー上面部の炎孔径に等しい。また、混合気の流速と燃焼速度が平衡状態を保持する円錐体の面上に火炎面が形成され、その面の傾斜は入力熱量 Q と空気比 m に依存して変化する。ここでは、炎孔径に無関係に、燃焼速度と炎孔を通過する混合気の流速は一定であると仮定して火炎面モデルを決定する。 $\phi 1.9$ mmの炎孔上部にある $\phi 4.5$ mm、深さ2mmの溝穴上の火炎を円錐体モデルの基準形状とし、火炎の高さは青、緑色光による火炎の可視化図Fig.4より類推した火炎長23mmで近似する。他の炎孔 $\phi 1.2$ 、 1.3 mmの火炎長は、炎孔径比による配分より6.1、6.6mmとする。さら

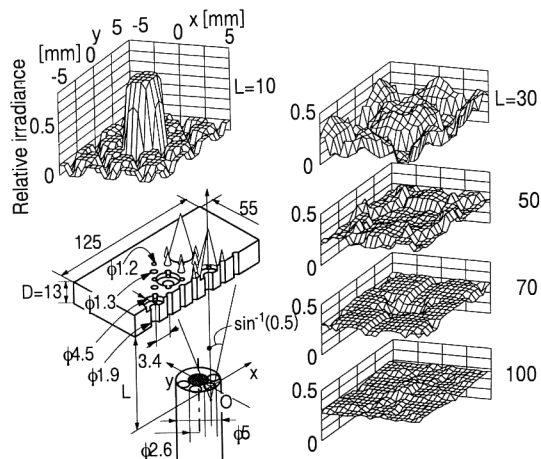


Fig. 9 Calculated irradiance of flame emission into fiber sensor.

に、仮想の火炎粒子光の受光点Oでの強度は、他火炎が光路線上に存在するか否かによらず、距離の2乗に反比例すると仮定する。なお、缶体壁、炎孔壁面からの反射は無視する。

ファイバーの設置距離 L と設置位置 (x, y) の受光量への影響を、上条件下で数値計算した結果がFig.9である。受光強度は、 $\phi 1.9$ mmの炎孔軸上で $L=0$ にファイバーを設置したときの受光量で無次元化して示す。 L が小さい場合には複数の炎孔からの受光が不可能で、ファイバーと炎孔配列との幾何学的な関係により、設置位置 (x, y) により受光強度は大きく変動する。 L の増大により炎孔配列の影響は低減し、一様な受光強度状態になる。実際のセンサー系は、単ファイバーが $\phi 2.6$ mmの円柱の外周に7本配置されるため、受光信号の偏りはさらに低減し、発光強度の時間的、空間的な乱れ成分も平滑化されることが予測できる。この結果より、 $L=70$ mmにセンサーを設置する。 $L=70$ mm近傍では、炎孔軸とファイバー軸の中心線の交差角が $\pm 5^\circ$ 程度の傾斜であれば、受光信号量の減少は微小であることも判明している。これらの諸特性は実験により確認している。

3.3 色光信号と空気比の検知特性

磁気風式酸素濃度計による空気比 m とファイバーセンサーで受光した V_b 、 V_g の色光信号の強度、およびその比 $R (= V_b/V_g)$ の関係をFig.10(a)~(c)に示す。 V_b 、 V_g 信号は、 $m < 1.1$ では入力熱量 Q に依存して大きく変動し、 $m = 0.95 \sim 1.05$ 近傍で最大値をとる。 $m > 1.1$ では各信号のレベル変動は少なく、 m の増大により単

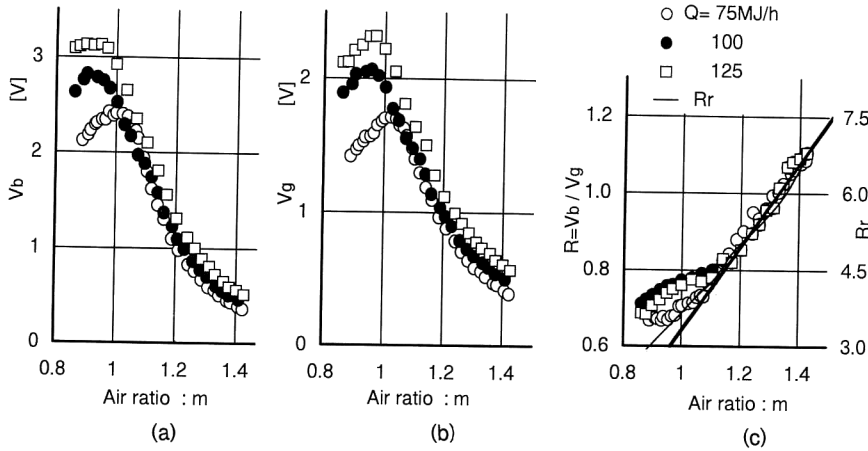


Fig. 10 Relationship between m and (a) V_b , (b) V_g and (c) R .

調に減少する。両信号比を示す Fig. 10(c) は、 $m > 1.1$ の領域では Q にほぼ無関係に R は m に比例して増大する。 $m < 1.1$ の領域でも R は単調増加の特性となる。また、 m の増大により、Fig. 6 の特性と同様に、火炎色が緑色から青色成分が強い状態に移行することが再確認される。

火炎光強度を、CH, C₂ のラジカル自発光量から検知した場合と、広帯域のガラスフィルターを介した色光量より検知した場合について比較検討する。Fig. 7 に m を変化させたときの火炎光の分光分析結果を付記する。スペクトル分布特性より、ラジカル発光成分に対して、主に熱放射に依存すると考えられる連続・平坦なスペクトル成分が大きく影響することがわかる。このバイアス量的な成分が 600 nm の波長域に近接するに従い、徐々に低減するのは光電子倍増管 R 446 の特性による。

理想的な狭帯域フィルターを分光分析器で代用し、CH, C₂ のラジカル自発光の強度比 R_r を算出した結果が Fig. 10(c) の細い実線である。広帯域と理想フィルターを用いた信号値を比較すれば、 $m > 1.1$ の領域では両信号の直線性には大差が生じないが、バイアス的なスペクトル成分の影響により、前者は後者に比べてゲインが 1/8 程度に低減して検知感度は悪化する。 $m < 1.1$ では両信号のレベルは大きく異なり、広帯域フィルターの場合には青色成分が増大し、ゲインはさらに低下することがわかる。

Fig. 10(c) の特性を用いて色光比 R と m の信号間の較正を行えば、センサー信号 R より混合気が燃焼する際の空気比 m_i を算定できる。ここでは磁気風式酸素濃度計による空気比 m と識別するため、 m_i で表記する。

空気比 $m_s = 1.25$ 近傍の定常運転時には、 $m_i = 0.92 \cdot R + 0.41$ の太い実線で示す直線を定義しても、動作点 $R = 0.95$ 近傍においては十分に良好な近似を得る。

センサーを単体で使用する場合には、時定数を 2 秒程度に設計すれば安定した空気比の計測が可能となる。

4. 実機ボイラーによる空気比制御

空気比制御系のブロック図を Fig. 1 に示す。制御系の概略的な動作は次のとおりである。流量 q (入力熱量 Q) のガスと流量 v の燃焼用空気の混合気は空気比 m_i で燃焼する。 v が一定の場合、 m_i は q 以外に空気温度 T に依存して変化する。 m_i を設定値 m_s に保持するため、 v をファンモーターの回転速度 n により調整する。このファンはボイラーの点火・消火時のエアバージ動作にも併用される機構であるため、動的な特性は 3 次の遅れ要素となる。ケーシング流路・風箱部などの混合気の輸送路特性はむだ時間要素となる。本制御系に組み込む空気比検知センサーは、他要素のフィルター特性による信号の平滑化が期待できるため、速応性を重視して時定数を短く 0.3 秒に設計している。調節器には比例 + 積分型調節計を用いている。

入力熱量が $Q = 100$ MJ/h を中心として、階段状に $\pm 10\%$ 強の変更を生じたときの諸量の応答線図が Fig. 11(a) である。燃焼用空気の温度 T を強制的に変化させた場合の応答線図が Fig. 11(b) である。空気比制御の有無は太線と細線で示す。応答線図には、試作センサーで計測した空気比 m_i と磁気風式濃度計による空気比 m 、ファンモーターの回転速度 n 、および NO_x 排出濃度の実測値を示す。磁気風式計測器の応答は、排出ガス

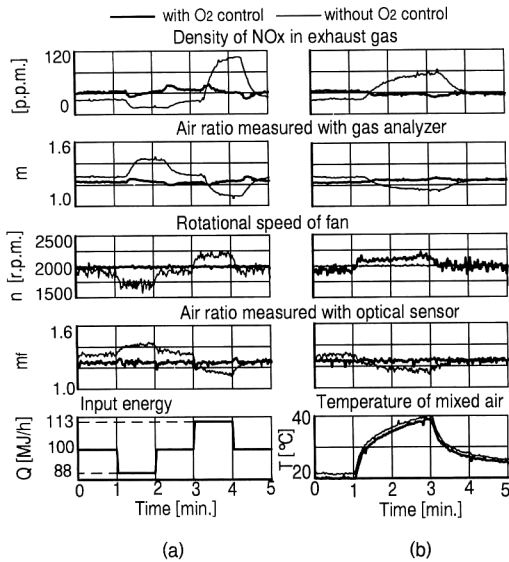


Fig. 11 Control response with fiber sensor against (a) step variation of Q and (b) variation of temperature of mixed air.

の吸引管路長などの影響により 20 秒程度の遅れを呈している。

この結果より、空気比制御を実行した際には、入力熱量 Q 、燃焼用空気の温度 T の影響を受けず、 NO_x 排出量は低減化されている。この検証実験により、 CO 排出量とともに熱損失も削減された高熱効率運転の実現が予期できる。そして、試作した簡易的なファイバー式空気比検知センサーは、速応性、検出精度も良好で、工業的に有用であると考えられる。

5. おわりに

ラジカル自発光成分を含む火炎色光比検知によるファイバー式センサーを試作・提案した。このセンサーは多

炎孔型バーナーを用いた予混合式・小型ボイラーの空気比制御系に実装が可能で、性能・価格比も良好である。また、本バーナー系の燃焼火炎の性状、センサーの構成手法、空気比検知信号に関する色光成分の分析と評価などを明確にした。センサー性能は実機ボイラーを用いて検証し、その有効性を確認した。これにより、連続的な供給熱量の変動に対して、低公害運転と高熱効率の運転の実現を可能にし、併せて実用的な空気比検知センサーとして有用であることを確認した。

文 献

- 1) 日本機械学会：技術資料 燃焼に伴う環境汚染物質の生成機構とその抑制法 (1980) p. 45.
- 2) 徳本恒徳, 石川善弘：特公平 5-32645.
- 3) M. G. Allen, C. T. Butler, S. A. Johnson, E. Y. Lo and F. R. Russo: "An imaging neural network combustion control system for utility boiler applications," *Combust. Flame*, No. 94 (1993) 205-214.
- 4) 伊藤文夫, 藤本健悦, 池辺弘茂, 田上市造, 下妻誠一郎, 宮前茂広：“火炎のスペクトル分析による燃焼状態の評価 (第1報, 重油火炎による基礎調査)”, *機学論 B*, No. 51-465 (1985) 1731-1735.
- 5) 関 一夫, 永田勝也：“全予混合燃焼バーナーの火炎電流による制御 (低 NO_x -比例制御)”, 第29回燃焼シンポジウム前刷集 (1991) pp. 175-177.
- 6) 酒井正博, 松井安次, 藤原通雄, 野間口有：“予混合火炎の空気比制御 (燈油の青炎燃焼に適用した場合)”, *機学論 B*, No. 46-402 (1980) 354-363.
- 7) 相馬憲一, 雪竹次太, 伊藤和行：“1台の CCD カメラを用いた火炎の空気比分布簡易計測”, 第31回燃焼シンポジウム前刷集 (1993) pp. 259-261.
- 8) 伊藤献一, 井原禎之, 立田節雄, 藤田 修：“火炎色の定量的表現とその応用 (XYZ 表色系色度座標の導入)”, *機学論 B*, No. 56-531 (1990) 3508-3513.
- 9) O. W. Bynum, Jr., D. R. Sheidan and J. A. White: "Sensors for natural gas combustion control systems, Phase 1. Market and technology assessment," GRI-92/0373, Gas Research Institute (1992).
- 10) 山口貴弘, 山田朝治, 田中輝夫, 内山寛信：“予混合燃焼式ガスバーナー系における空・燃混合状態の推定”, *空調衛生論*, No. 59 (1995) 印刷中.
- 11) 水谷幸夫：燃焼工学, 第2版 (森北出版, 1989) p. 77.