

循環バーナーの動作モデル

(平成13年11月30日 原稿受付)

機械知能工学科 津 田 時 範
 宇部興産(株) 光 成 仁
 ニチアス(株) 高 野 純一郎
 機械知能工学科 橘 武 史

Action model on recirculation burner

by TSUDA Tokinori

MITSUNARI Hitoshi

TAKANO Jun-ichiro

TACHIBANA Takeshi

Abstract

A combustion in which fuel and oxygen are supplied and burned gas namely carbonic acid gas and water vapor are utilized as dilution materials is presented. We name it a recirculation combustion. On the recirculation combustion, nitrogen oxide is not at all emitted because air is not used. And heat utilization factor is necessarily high because exhaust enthalpy is only enthalpy which burned gas, excess oxygen and condensed water possess. In case of the combustion is incomplete, un-burned fuel and carbon monoxide are left in the apparatus. Combustion must be complete. Air tight too is necessary. According to the circumstances, ignition and flame holding are unstable.

1. 緒 言

燃料と酸素を供給し、希釈剤としては燃焼の結果発生する炭酸ガスと水蒸気の混合気体（即ち既燃気体。これに余剰酸素を含めて既燃気体と呼ぶ事も行う。）を利用する燃焼を考えた。この燃焼を循環燃焼と呼ぶ事にする。この循環燃焼では空気を使わないので、窒素酸化物は全く発生しない。又、循環燃焼では外に捨てるエンタルピーは、上記既燃気体・余剰酸素と水蒸気が凝縮してできる水が保有するものだけであり、熱利用率が必然的に高くなる。しかし循環燃焼では例えば燃焼が不完全であると、未燃燃料や一酸化炭素等の可燃物が装置内に充満する。これを避ける為、酸素不足にならない様に注意し、燃料・酸素・既燃気体の混合を非常に良くして組成の斑を小さくして、完全燃焼させなければならない。又、燃料・酸素の供給量と既燃気体の戻し量の調節を精密に行う必要がある。既燃気体中の一酸化炭素濃度や未燃燃料濃度の監視等も必要である。又、空気を吸い込む事が無い様にする為に装置に気密が必要である（装置が密閉に近くなる）。この為、着火・保炎が困難となり、燃焼が

振動的になる事もあるが、解決の手段はある⁽¹⁾。尚、この循環燃焼は純粋酸素を準備しなければならない点が大い短所であるが、上空又は深海等空気が存在しない所で運転可能な事が特長である。又バーナーへの適用だけで無く、内燃機関にも適用出来る。

この循環燃焼に関して過去数年間研究してきてその報告もある^{(1)~(6)}が、本報告は循環燃焼をするバーナーの動作モデルに付いて考察し纏めたものである。条件を与えて未燃混合気体の組成と既燃気体の組成を表示し、運転初期の組成の過渡変化（主として窒素減少に注目する）に付いて検討・試算する。又、熱収支に付いて検討する。可燃濃度範囲や燃焼速度の予測も重要な燃焼特性ではあるが、行っていない。

2. 記 号

C_p : 下添字の物質の定圧モル比熱 J/molK
 C_{pf} : 燃料の定圧モル比熱 J/molK
 C_{pm} : 湿り既燃気体の T_0 と T_a の間の平均の定圧モル比熱 J/molK、 T_0 は発熱量を定義した温度

- C_w : 水のモル比熱 J/molK
- h : 単位時間に移動するエンタルピー W
- l_u : 湿り既燃気体の比モル流量 (燃料供給モル流量の倍数)
- M : 分子量 g/mol
- m : 炭化水素燃料の炭素 C の原子数
- n : 炭化水素燃料の水素 H の原子数
- q_{fl} : 燃料のモル発熱量 J/mol
- T_a : 理論定圧断熱火炎温度 K
- t_b : 分岐点の既燃気体温度 °C
- t_{db} : 分岐点の既燃気体の露点 °C、式 (7) を参照の事
- t_{du} : 未燃混合気体の露点 °C、式 (15) を参照の事
- t_u, T_u : 未燃混合気体温度 °C、K
- α : 酸素過剰率、 $\alpha = \text{未燃混合気体中の酸素モル流量} / (2 \times \text{燃料(メタン)供給モル流量}) - 1 \geq 0$ 、体積流量 (例えば 1 atm、20°C の) を取っても同じ。供給時点での酸素過剰率 = $\alpha / (1 + \gamma)$
- β_b : 分岐点気体 (既燃気体) の水蒸気残存率、モル又は体積残存率
- β_u : 未燃混合気体の水蒸気残存率、モル又は体積残存率
- γ : 戻し比、 $\gamma = \text{戻し気体のモル又は体積流量又は質量流量} / \text{排出気体のモル又は体積流量又は質量流量}$
- ζ_l : 供給物質 (燃料 C_mH_n ・酸素 O_2) 量と分岐点から外に排出される既燃物質 (CO_2 ・水蒸気・凝縮水・過剰 O_2) 量の比、モル又は体積比
- η : 熱利用率

- ν_l : 残存窒素量の供給燃料量に対するモル比 (又は体積比)
- ω_{CH_4} : メタン CH_4 のモル分率 (体積、圧力分率。以下同)
- $\omega_{C_mH_n}$: 炭化水素 C_mH_n のモル分率
- ω_{CO_2} : 炭酸ガス CO_2 のモル分率
- ω_{H_2O} : 水蒸気 H_2O のモル分率
- ω_{O_2} : 酸素 O_2 のモル分率
- ω_s : 無次元水蒸気圧、式 (6) を参照の事

3. モデル考察

ここで行うモデル考察は燃焼が予混合燃焼か拡散燃焼か、又、層流燃焼か乱流燃焼かには無関係である。しかし完全燃焼すると仮定する。

3.1 装置内各部の気体の組成

バーナーを内部に空気が充満している状態で始動すると、時間経過と共に装置内部の気体の組成が変わっていく。時間が十分に経過すると内部の窒素は全て排出される。このようになった時の装置内各部の気体の組成に付いて考察する。図1にこのバーナーの動作モデル図を示す。装置内圧力は位置によらず一定で標準大気圧 (0.101325MPa) とする。燃料は炭化水素 (必要に応じて気体) とし C_mH_n で表し、これの供給量を基準量 1 (簡単の為例えば 1 mol/s) に取る。成分物質の量 (分子記号の前に記載) は燃料 C_mH_n 量に対する倍数で表す。酸素供給量は図に示す様に C_mH_n 供給量の $[1 + \alpha / (1 + \gamma)] (m + n/4)$ 倍である。 $\alpha (\geq 0)$ は未燃混合気体の酸素過剰率であって、酸素 O_2 量を C_mH_n 量 (供給量に等しい) の

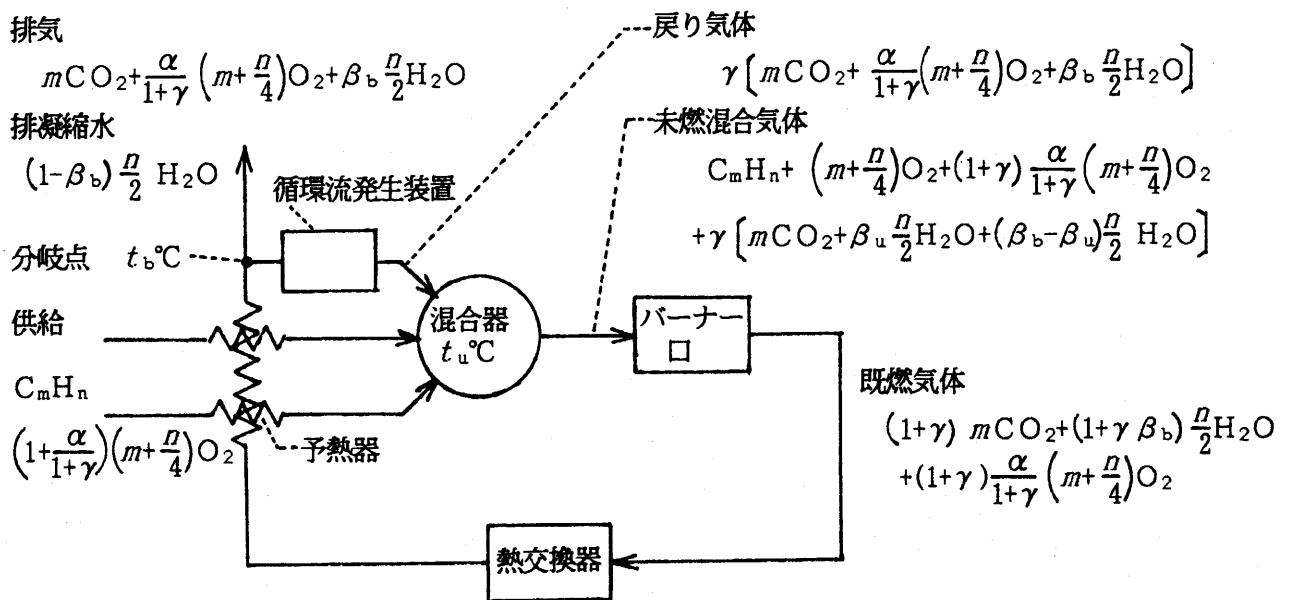


図1 循環バーナーの動作モデル図 (物質収支)

$m+n/4$ 倍で割って 1 を引いたものである*1。既燃気体と凝縮水は分岐点から外に出る。循環流発生装置（可変速ブロー）を設けているので、既燃気体は混合部（混合器）にも行く（戻ると表現する）。 γ は戻し比と呼ぶものであって、分岐点から戻す既燃気体量と捨てる既燃気体量の比である。これら燃料・酸素と既燃気体が混合部（混合器）に入る。この三成分の気体から成る未燃混合気体が燃焼部（バーナー口）で燃焼するのであるが、完全燃焼を仮定し、燃焼後の気体即ち既燃気体の組成は $\text{CO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot \text{余剰の } \text{O}_2$ から成るとする。

分岐点での既燃気体（凝縮水を除いた気体のみ）の組成を考える。分岐点気体温度を t_b °C とする。図 1 の排出気体又は戻し気体の各分子式の量の比較から、既燃気体中に占める各成分気体の割合（モル分率）は次のようになる。

$$\omega_{\text{CO}_2, b} = \frac{1}{1 + \beta_b n / 2m + [\alpha / (1 + \gamma)] (1 + n / 4m)} \quad (1)$$

$$\omega_{\text{H}_2\text{O}, b} = \frac{\beta_b n / 2m}{1 + \beta_b n / 2m + [\alpha / (1 + \gamma)] (1 + n / 4m)} \quad (2)$$

$$\omega_{\text{O}_2, b} = \frac{[\alpha / (1 + \gamma)] (1 + n / 4m)}{1 + \beta_b n / 2m + [\alpha / (1 + \gamma)] (1 + n / 4m)} \quad (3)$$

但し m, n は燃料の C, H の原子数であり、 β_b は分岐点気体の水蒸気残存率（凝縮する割合が多いとこれは小さくなる。モル又は体積残存率）と称すものであって、次式（4）又は（5）で表される。

$$\beta_b = 1 \quad (t_b \geq \text{分岐点気体の露点 } t_{db} \text{ の場合}) \quad (4)$$

$$\beta_b = \left[1 + \frac{\alpha}{1 + \gamma} \left(1 + \frac{n}{4m} \right) \right] \frac{2m}{n} \frac{\omega_{sb}}{1 - \omega_{sb}} \quad (t_b < t_{db} \text{ の場合}) \quad (5)$$

ω_{sb} は分岐点気体の水蒸気圧 (0.101325MPa で割った無次元圧力) であり、例えば次式で表される。

$$\log_e \omega_{sb} = 49.55 - \frac{6853}{t_b + 273.15} - 5.265 \log_e (t_b + 273.15) \quad (6)$$

又、分岐点気体の露点は次式（7）を満す温度 t_{db} °C である。

$$\frac{6853}{t_{ab} + 273.15} + 5.265 \log_e (t_{ab} + 273.15) = 49.55 - \log_e \omega_{\text{H}_2\text{O}, db} \quad (7)$$

右辺の $\omega_{\text{H}_2\text{O}, db}$ は前式（2）に於いて $\beta_b = 1$ としたもので

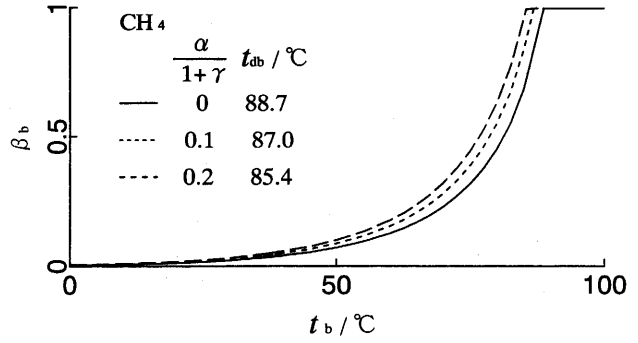


図2 分岐点気体の温度 t_b と水蒸気残存率 β_b

ある。即ち、

$$\omega_{\text{H}_2\text{O}, db} = \frac{n / 2m}{1 + n / 2m + [\alpha / (1 + \gamma)] (1 + n / 4m)} \quad (8)$$

である。

この様に分岐点気体温度 t_b は水蒸気圧 ω_{sb} を定め、分岐点での既燃気体中に占める水蒸気の割合 $\omega_{\text{H}_2\text{O}, b}$ 及び水蒸気残存率 β_b を定める。以上から、分岐点での既燃気体組成は戻し比 $\gamma \cdot \alpha \cdot t_b$ により決まる事が分かる。供給時点での酸素過剰率と分岐点気体温度 t_b を一定にすると、この組成は戻し比 γ にはよらなくなる。メタン CH_4 ($m = 1, n = 4$) の場合の t_b と β_b の関係を図 2 で示す。

混合部に戻す物質は気体のみとし、組成は捨てる気体の組成と同じであり、量は捨てる気体の量の戻し比 γ 倍であるとする。凝縮水は戻さない*2。

次に未燃混合気体（混合部出口～バーナー口上の火炎直前）の組成を考える。未燃混合気体の温度を t_u °C とする。未燃混合気体の各分子式の量の比較から、未燃混合気体中に占める各成分気体の割合（モル分率）は次のようになる。

$$\omega_{\text{CmHnu}, u} = \frac{1 / (\gamma m)}{1 / (\gamma m) + [(1 + \alpha) / \gamma] (1 + n / 4m) + 1 + \beta_u n / 2m} \quad (9)$$

$$\omega_{\text{O}_2, u} = \frac{[(1 + \alpha) / \gamma] (1 + n / 4m)}{1 / (\gamma m) + [(1 + \alpha) / \gamma] (1 + n / 4m) + 1 + \beta_u n / 2m} \quad (10)$$

$$\omega_{\text{CO}_2, u} = \frac{1}{1 / (\gamma m) + [(1 + \alpha) / \gamma] (1 + n / 4m) + 1 + \beta_u n / 2m} \quad (11)$$

$$\omega_{\text{H}_2\text{O}, u} = \frac{\beta_u n / 2m}{1 / (\gamma m) + [(1 + \alpha) / \gamma] (1 + n / 4m) + 1 + \beta_u n / 2m} \quad (12)$$

ここに β_u は未燃混合気体の水蒸気残存率（モル又は体積残存率）であって、条件によって次式（13）又は（14）で

* 1 1 を差し引かない定義が有って、これが普通の定義である。本報では酸素の過剰分をはっきりと表に出す為、1 を差し引いたもので定義した。

* 2 凝縮水に戻すとこの水が火炎直前に来る迄に蒸発させなければならず、組成に斑が出来易い。又その他の理由も有り、凝縮水は捨てて戻さない事にした。続報②の 3. を参照されたい。

表される。

$$\beta_u = \beta_b \quad (t_u \geq \text{未燃混合気体の露点 } t_{du} \text{ の場合}) \quad (13)$$

$$\beta_u = \left[\frac{1}{\gamma m} + \frac{1+\alpha}{\gamma} \left(1 + \frac{n}{4m} \right) + 1 \right] \frac{2m}{n} \frac{\omega_{su}}{1-\omega_{su}} < \beta_b \quad (t_u < t_{du} \text{ の場合}) \quad (14)$$

ω_{su} は未燃混合気体の水蒸気圧 (0.101325MPa で割った無次元圧力) である。

未燃混合気体の露点は前式 (7) 類似の次式 (15) を満たす t_{du} °C である。

$$\frac{6853}{t_{du} + 273.15} + 5.265 \log_e (t_{du} + 273.15) = 49.55 - \log_e \omega_{H_2Odu} \quad (15)$$

ω_{H_2Odu} は分岐点気体の場合に類似に、式 (12) に於いて $\beta_u = \beta_b$ としたものである。即ち、

$$\omega_{H_2Odu} = \frac{\beta_b n / 2m}{1 / (\gamma m) + [(1+\alpha) / \gamma] (1 + n / 4m) + 1 + \beta_b n / 2m} \quad (16)$$

である。

これらの式から未燃混合気体の凝縮に関して次の様な事が分かる。即ち、未燃混合気体の温度 $t_u \geq$ 未燃混合気体の露点 t_{du} であれば未燃混合気体ができる過程 (既燃気体と供給燃料・酸素が混合する過程) で追加の凝縮は起こらず、未燃混合気体の水蒸気残存率 β_u は、分岐点の既燃気体の水蒸気残存率 β_b と同じである。逆に $t_u < t_{du}$

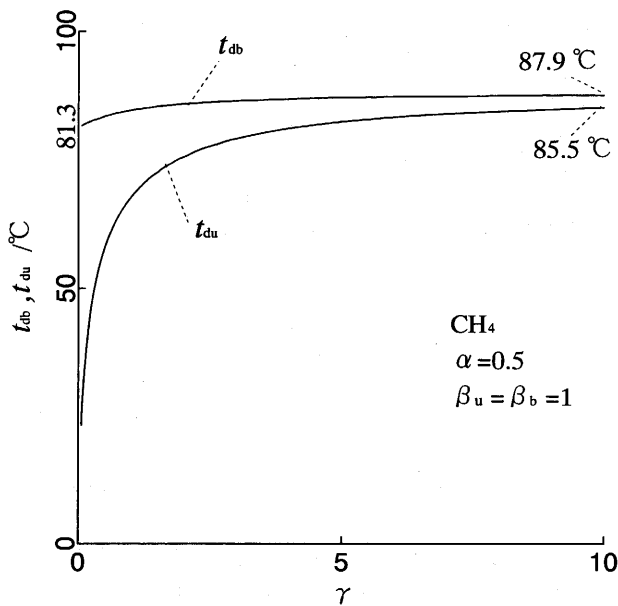


図3 戻し比 γ と分岐点気体の露点 t_{db} 、未燃混合気体の露点 t_{du}

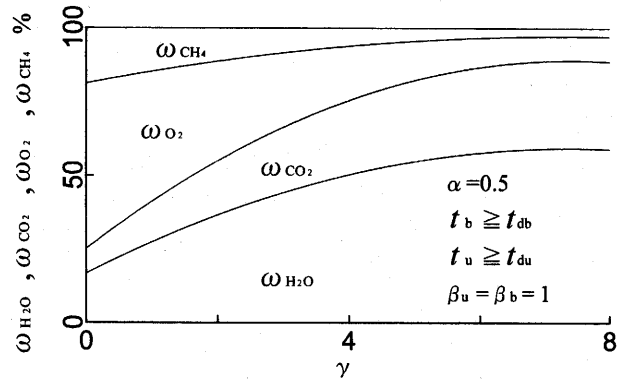


図4 戻し比 γ と未燃混合気体組成 (モル分率) ω_{H_2O} , ω_{CO_2} , ω_{O_2} , ω_{CH_4}

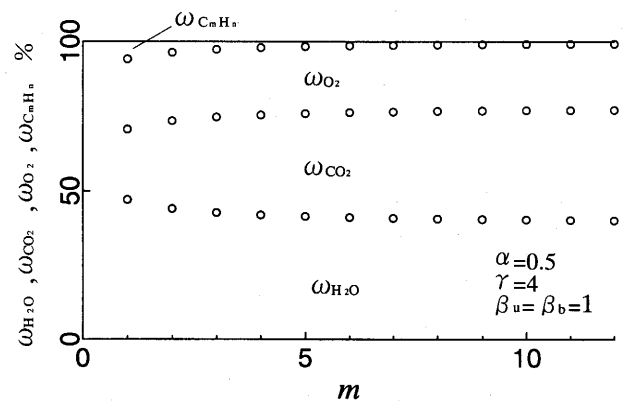


図5 炭化水素燃料 C_mH_n (パラフィン族 $n=2m+2$) の m と未燃混合気体の組成 (モル分率) ω_{H_2O} , ω_{CO_2} , ω_{O_2} , ω_{CmHn}

となればこの過程で追加の凝縮が起こり、水蒸気残存 β_u は β_b よりも小さい値となる*3。分岐点の既燃気体の露点 t_{db} と未燃混合気体の露点 t_{du} の関係を図3で示す。

この様に未燃混合気体組成は $t_b \cdot \gamma \cdot \alpha$ 以外に、 t_u の影響を受ける (但し $t_u < t_{du}$ の場合)。メタンに付いて、 γ を変えた場合の未燃混合気体組成 (モル分率) を図4に示す。又、燃料 C_mH_n の m, n を変えた場合の未燃混合気体組成 (モル分率) を図5に示す。

続報²⁾の実験 (燃料はメタン) で既燃気体の組成をガスクロマトグラフとオルザットガス分析器で測定した。この測定値と式 (1)~(3) から出した値 (未燃混合気体温度 t_b ・戻し比 γ ・酸素過剰率 α を測定値で与えての) は差が1%程度以下であった。

バーナー口上で火炎が存在・位置する為にはバーナー口での未燃混合気体の流速と燃焼速度の間には拘束関係がある。従って戻し比 γ の値には存在可能範囲があって、どんな値でも採れるのでは無い^{2), (3), (5)~(7)}。 γ の最小値は火炎が逆火する寸前の値であり、最大値は火炎が浮上

* 3 追加の凝縮を許すと脚注 * 2 で述べたのと同じ不都合が生じるので、実際のバーナーでは追加の凝縮が起こらない様にする。続報²⁾の3.1, 4.1, 4.3 (4b) を参照されたい。

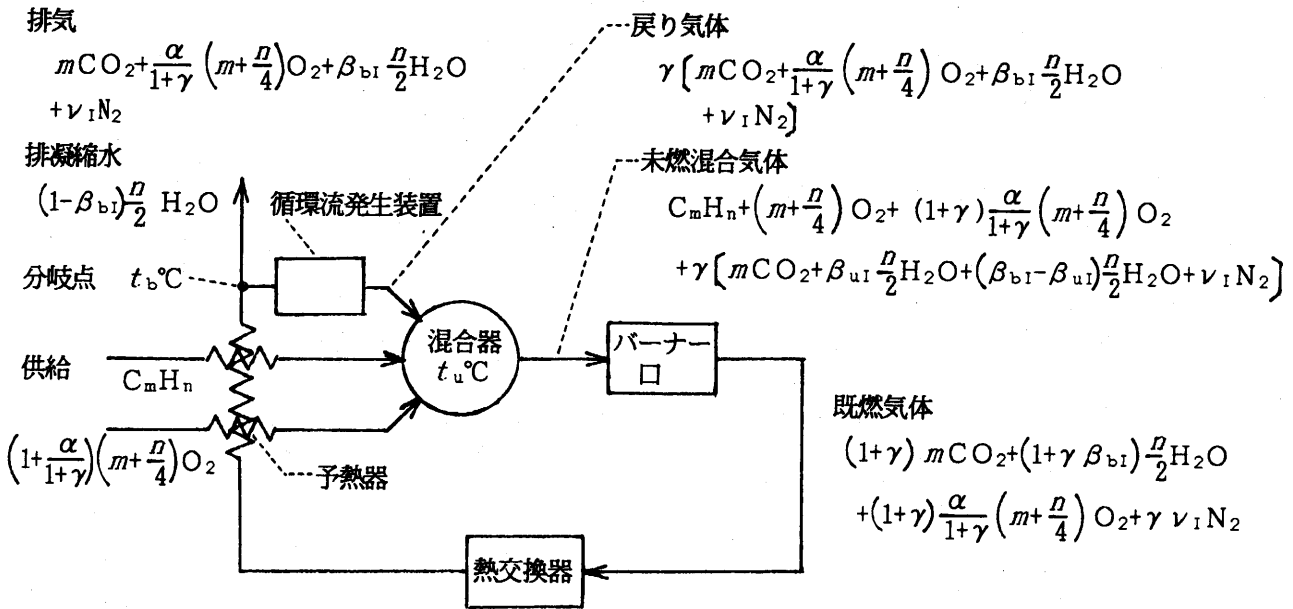


図6 循環バーナーの動作モデル図 (物質収支・過渡期間)

る又は吹飛ばす寸前の値である。本バーナーの燃焼に関する特性を調べる続報^②で γ の値の存在可能範囲を明らかにする。

3.2 過渡期間

本循環バーナーの運転開始はバーナー内に窒素が無く既燃気体が詰まっている状態からでも、空気が詰まっている状態からでも可能である。ここでは装置内に空気が充満して循環しているところに燃料のみを供給し*4、着火する運転開始方法を取り上げる。着火した後、空气中酸素は消費されるので、減少を補う様に酸素を供給する。戻し量の調節も必要である。着火以後バーナー内気体の組成がどの様に変化して行くかをシミュレートしてみる。このシミュレーションは一例であって、他にも色々考えられるであろう。例えば戻し比 γ を周回数 I (後出)によって変える、既燃気体と残存窒素からなる排出物質の量と供給物質の量を一定にする等。

図6のモデル図を参照されたい。モデル考察を簡単にする為、分岐点~循環流発生装置~混合器~バーナー口間の体積を零と仮定する。供給燃料・酸素・既燃気体(初めは空気)が完全混合するのに時間がかからなく、体積も必要ないとする。即ち混合による組成変化は不連続と見る。バーナー口上での燃焼による未燃混合気体から既燃混合気体への組成変化も不連続的と見る。この様に

混合も燃焼も不連続と見る*5。気体組成の値を表すのに添字 I を用いる。この I は組成の異なる既燃気体の不連続がループ(脚注*5を参照の事)を廻った回数(周回数)を表す整数とする。又 i' はこの不連続の位置(バーナー口~分岐点間、 $0 \leq i' < 1$)を表す実数とする。そして実数 $i = I + i'$ を定義する。これは着火からの経過を表す量である。

着火して最初にできる不連続は空気と既燃気体の間の組成変化である。混合・燃焼による組成の不連続がバーナー口から出て分岐点に達する迄を $0 \leq i < 1$ (即ち $I = 0$)とする。この場合は燃料 $C_m H_n$ は1(例えば1 mol/s)程供給し、酸素 O_2 は燃料 $C_m H_n$ の $\alpha/(1 + \gamma)(m + n/4)$ 倍程供給する。 $(\alpha$ は酸素過剰率、 γ は戻し比。)混合器へ戻る空気($O_2 + 79/21 \times N_2$)量は $C_m H_n$ 量の $m + n/4$ 倍とする。 $I = 0$ の場合の、装置内に在る空气中の窒素分の量の供給燃料量1に対するモル比を ν_0 で表す。これは、

$$\nu_0 = \frac{79}{21} \left(m + \frac{n}{4}\right) \tag{17}$$

である。又、供給燃料量1と供給酸素量 $\alpha/(1 + \gamma)(m + n/4)$ の和と分岐点から外に排出される空気量 $(m + n/4) + \nu_0$ のモル比を ζ_0 で表す。

$$\zeta_0 = \frac{1 + \left[\frac{\alpha}{(1 + \gamma)}\right] \left(m + \frac{n}{4}\right)}{\left(m + \frac{n}{4}\right) + \nu_0} \tag{18}$$

*4 後に述べる様に実は、装置内空気の酸素量と供給燃料量が量論比になるようにし、酸素過剰率が $\alpha/(1 + \gamma)$ 程の酸素を供給する。続報^②の4.3(1)を参照の事。

*5 混合・燃焼が不連続であって既燃気体がループ(混合器~バーナー口~熱交換器~分岐点~混合器)を廻ってもこの不連続が保持される事は続報^②の実験でも確かめられた。則ち $i = 1$ の瞬間(未燃混合気体がメタン・空気からこれに $CO_2 \cdot H_2O$ が加わったもの)に変わる不連続がバーナー口上の火炎を通過する瞬間)の燃焼音と火炎形状変化で確かめられた。

質量比で表す ζ_0 類似の量 ζ'_0 は、

$$\zeta'_0 = \frac{M_{C_m H_n} + [\alpha / (1 + \gamma)](m + n / 4)M_{O_2}}{(m + n / 4)M_{O_2} + \nu_0 M_{N_2}} \quad (19)$$

となる。

$I = 0$ の場合、分岐点気体・未燃混合気体に既燃気体は含まれていないので、凝縮は無い。

$\gamma \cdot \alpha \cdot \nu_0$ 等を使って3.1で行ったのと同様に分岐点気体・未燃混合気体の各分子式の量の比較から、分岐点気体・未燃混合気体の組成を表す事が出来る（この場合のモデル図と組成式を表示するのは省略する）。

$i \geq 1$ （即ち $I \geq 1$ ）の場合の供給物質・排出物質と装置内各位値の組成式は図6中に示す。分子式の表示方法は3.1の場合と同じである。 ν_I は残存窒素量の供給燃料量に対するモル比（又は体積比）である。

$$\nu_I = \frac{\gamma}{1 + \gamma} \nu_{I-1} \quad (20)$$

これは漸化式である。

又、 ζ_I は次式で示す様に供給物質（燃料 $C_m H_n$ ・酸素 O_2 ）量と分岐点から外に排出される既燃気体（ CO_2 ・水蒸気・凝縮水・過剰 O_2 ・ N_2 ）量の比である。供給量と排出量のモル比 ζ_I は、

$$\zeta_I = \frac{1 + [1 + \alpha / (1 + \gamma)](m + n / 4)}{m + n / 2 + [\alpha / (1 + \gamma)](m + n / 4) + \nu_I} \quad (21)$$

となる。質量比で表す ζ_I 類似の量 ζ'_I は、

$$\zeta'_I = \frac{M_{C_m H_n} + [1 + \alpha / (1 + \gamma)](m + n / 4)M_{O_2}}{M_{CO_2} + n / 2 M_{H_2O} + [\alpha / (1 + \gamma)](m + n / 4)M_{O_2} + \nu_I M_{N_2}} \quad (22)$$

となる。

$I = 0$ の場合と同様、図6の分岐点気体・未燃混合気体の各分子式の量の比較から、 $\gamma \cdot \alpha \cdot \nu_I \cdot \beta_{bl} \cdot \beta_{ul}$ 等を使って分岐点気体・未燃混合気体の組成（モル分率）を表す事が出来る。未燃混合気体の組成を表して見る。

$$\omega_{C_m H_n, ul} = \frac{1 / \gamma m}{P_I} \quad (23)$$

$$\omega_{O_2, ul} = \frac{[(1 + \alpha) / \gamma](1 + n / 4m)}{P_I} \quad (24)$$

$$\omega_{CO_2, ul} = \frac{1}{P_I} \quad (25)$$

$$\omega_{H_2O, ul} = \beta_{ul} \frac{n / 2m}{P_I} \quad (26)$$

$$\omega_{N_2, ul} = \frac{\nu_I / m}{P_I} \quad (27)$$

ここに式(23)~(27)の分母 P_I は

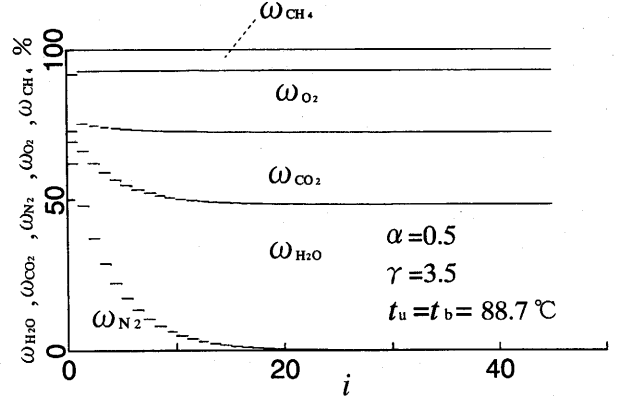


図7 経過を表す実数 i と未燃混合気体の組成（モル分率）

$$P_I = \frac{1}{\gamma m} + \frac{1 + \alpha}{\gamma} \left(1 + \frac{n}{4m}\right) + 1 + \beta_{ul} \frac{n}{2m} + \frac{\nu_I}{m} \quad (28)$$

である。この P_I は式(9)~(12)の分母（但し β_u を β_{ul} に変える）に ν_I / m を加えたものに等しい。

β_{ul} は未燃混合気体の水蒸気残存率（モル又は体積残存率）であって、次式(29)又は(30)で表される。

$$\beta_{ul} = \beta_{bl} \quad (t_{ul} \geq \text{未燃混合気体の露点 } t_{dul} \text{ の場合}) \quad (29)$$

$$\beta_{ul} = \frac{m + [\alpha / (1 + \gamma)](m + n / 4) + \nu_I}{n / 2} \frac{\omega_{sul}}{1 - \omega_{sul}} < \beta_{bl} \quad (t_{ul} < t_{dul} \text{ の場合}) \quad (30)$$

β_{bl} は分岐点気体の水蒸気残存率（モル又は体積残存率）、 t_{ul} は未燃混合気体の温度、 ω_{sul} は水蒸気圧（無次元）である。未燃混合気体の露点 t_{dul} と水蒸気圧 $\omega_{H_2O, dul}$ の関係を表す式は3.1の式(15)と(16)に類似（添字 I を使う）の式である。

周回数 I を ∞ にすると残存窒素量の供給燃料量に対するモル比（又は体積比） $\nu_{I=\infty}$ は

$$\nu_{I=\infty} = 0 \quad (31)$$

となり、供給物質と排出物質の比 $\zeta_{I=\infty}$ は

$$\zeta_{I=\infty} = \frac{1 + [1 + \alpha / (1 + \gamma)](m + n / 4)}{m + n / 2 + [\alpha / (1 + \gamma)](m + n / 4)} \quad (32)$$

となる。即ち装置内から N_2 分は無くなり、供給物質と排出物質の比は一定になる。（式(32)で解る様にモル比 $\zeta_{I=\infty}$ は一般には1にならない。しかし質量比 $\zeta'_{I=\infty}$ は1になる。）式(23)~(26)は3.1の式(9)~(12)に等しくなる。

燃料がメタンの場合の未燃混合気体の組成（モル分率）変化の試算の例を図7に示す。20 ≤ i < 21 即ち周回数 $I = 20$ で N_2 分は殆ど無くなり、組成は殆ど確定している。パラメータの値と組成が確定する I の値の関係は次

排気と排気縮水

$$h_o = \left[m M_{CO_2} C_{pCO_2} + \frac{\alpha}{1+\gamma} \left(m + \frac{n}{4} \right) M_{O_2} C_{pO_2} + \beta_b \frac{n}{2} M_{H_2O} C_{pH_2O} \right] t_b + (1-\beta_b) \frac{n}{2} M_{H_2O} C_w t_b$$

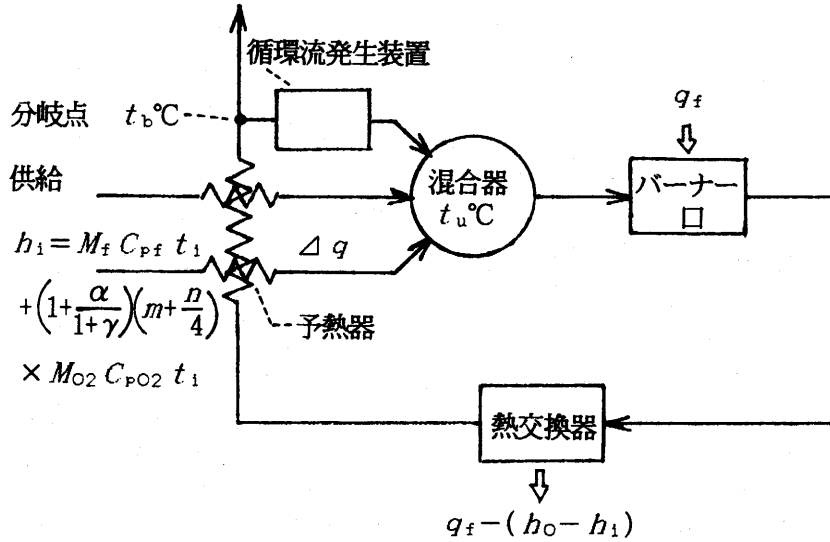


図8 循環バーナーの動作モデル図 (熱収支)

の様であった。分岐点気体温度 t_b が高い程、戻し比 γ が小さい程 (未燃混合気体の酸素過剰率 α が大きい程) 小さい I で組成が確定する。(但し供給時点の酸素過剰率を一定にした場合。)

装置の体積と燃料・酸素の供給流量を考えに入れると、着火からの経過時間 = 係数 × 装置の体積 / 供給モル又は体積流量 × i と考える事ができる。この係数は装置内各部分の温度から定まるものである。

3.3 熱収支、熱利用率

このバーナーの熱収支に付いて考える。図8を参照されたい。分子式の表示方法は3.1、3.2の場合と同じである。燃料 $C_m H_n$ の供給量は 1 mol/s とし、各成分物質の量を mol/s に取る。燃料のモル比熱を C_{pf} 、酸素 O_2 の定圧モル比熱を C_{pO_2} とし、供給物質 (燃料・酸素) の温度を t_1 とする。二酸化炭素 CO_2 の定圧モル比熱を C_{pCO_2} 、水蒸気 H_2O の定圧モル比熱を C_{pH_2O} 、水のモル比熱を C_w とする。排出物質 (二酸化炭素・水蒸気・酸素・水) の温度は t_b とする。排出物質が単位時間に持ち出すエンタルピー h_o から供給物質が単位時間に持ち込むエンタルピー h_i を差し引いたものを Δh で表すとこれは、

$$\Delta h = h_o - h_i = \left[m C_{pCO_2} + \frac{n}{2} \beta_b C_{pH_2O} + \frac{n}{2} (1-\beta_b) C_{pw} + \alpha \left(m + \frac{n}{4} \right) C_{pO_2} \right] t_b - \left[C_{pf} + \left(1 + \frac{\alpha}{1+\gamma} \right) \left(m + \frac{n}{4} \right) C_{pO_2} \right] t_1 \quad (33)$$

である。 γ は戻し比、 α は酸素過剰率、 β_b は分岐点気体の水蒸気残存率 (モル又は体積残存率) である。

燃料 $C_m H_n$ のモル発熱量を q_n とする。 $q_f - \Delta h$ は熱交換器で外部に取り出す熱量である。これを q_n で割ったものを熱利用率 η と呼ぼう。即ち、

$$\eta = 1 - \frac{\Delta h}{q_n} \quad (34)$$

である。

一例として $t_1 = 25^\circ C$ 、 $t_b = 125^\circ C$ とし $\alpha = 0$ と採って見ると、メタン ($q_n = 8.02 \times 10^5 J/mol$) の場合 $\eta = 0.96$ と、非常に高い値になる。これはこの燃焼では希釈剤として既燃気体を利用するのであり、普通のバーナーと違って窒素を高温にして外部に捨てる事をしないで済む (Δh が小さい) からである。尚、図8中の熱移動量 Δq は燃料・酸素の温度を供給温度 t_1 から分岐点気体温度 t_b 迄高める為に必要な熱量であり、既燃気体から移動して来る。

3.4 理論定圧断熱火炎温度

理論定圧断熱火炎温度・層流燃焼速度は燃料の種類と発熱量と3.1で求めた未燃混合気体の組成と温度が分かれば算出できる。燃料が完全燃焼し、火炎から外部への熱移動・熱放射が無く、熱解離は無いとした場合の理論定圧断熱火炎温度 T_a を求めて見る。この温度 T_a は次式 (35) で表される。

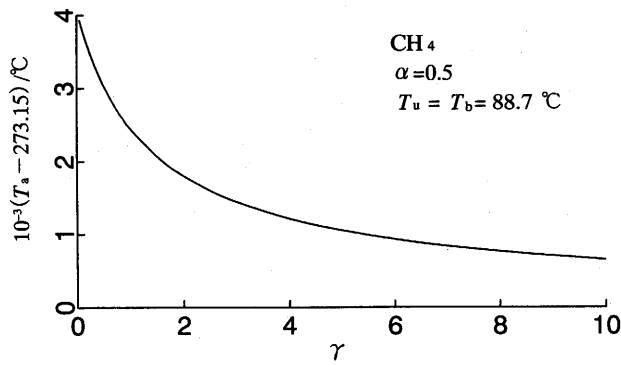


図9 戻し比 γ と理論定圧断熱火炎温度 T_a

$$T_a = \frac{q_{fl} + l_u C_{pu}(T_u - T_0)}{l_u C_{pm}} + T_0 \quad (35)$$

ここに、 q_{fl} は燃料の定圧低位モル発熱量、 l_u は湿り既燃気体（燃焼して出来た気体）の比モル流量（燃料供給モル流量の倍数）、 C_{pu} は未燃混合気体の定圧モル比熱、 T_u は未燃混合気体の温度、 T_0 は発熱量を定義した温度、 C_{pm} は湿り既燃気体の定圧モル比熱の温度 T_0 と T_a の間の平均値である。湿り既燃気体の比モル流量 l_u は未燃混合気体の組成で決まるので、 $t_b \cdot \gamma \cdot \alpha$ で決まる。未燃混合気体の定圧モル比熱 C_{pu} は未燃混合気体の組成と温度で決まるので、 $t_b \cdot \gamma \cdot \alpha \cdot T_u$ で決まる。湿り既燃気体の定圧モル比熱の平均値 C_{pm} は湿り既燃気体の組成と未燃混合気体の温度 T_u と求めるべき火炎温度 T_a で決まるので、これも又 $t_b \cdot \gamma \cdot \alpha \cdot T_u$ と T_a で決まる。結局、理論定圧断熱火炎温度 T_a は $t_b \cdot \gamma \cdot \alpha \cdot T_u$ の全てで決まる。理論定圧断熱火炎温度 T_a の一計算例を図9に示す。

4. まとめ

循環バーナーの動作モデルを確立し、分岐点での既燃気体組成・未燃混合気体の組成・火炎温度及び本バーナーの熱収支・熱利用率に付いて考察し試算した。着火から窒素が無くなる迄の過渡期間の既燃気体・未燃混合気体の組成の変化に付いても考察し試算した。

参考文献

- (1) 高野純一郎、循環燃焼器における振動燃焼の抑制、九州工業大学工学部修士論文（1996年度）。
- (2) 津田時範・光成 仁・高野純一郎・橋 武史、循環バーナーの燃焼特性、九州工業大学研究報告（工学）、第74号（2002）、47-55。
- (3) 光成 仁、無窒素排気循環燃焼システムの燃焼特性、九州工業大学工学部修士論文（1996年度）。
- (4) 津田時範・橋 武史、循環バーナーの基本特性、日本機械学会中国四国支部39期総会講演会論文集 No.15-1（2001）、101-102。
- (5) 津田時範・橋 武史、循環バーナーの燃焼特性、日本機械学会北陸信越支部38期総会講演会論文集 No.17-1（2001）、189-190。
- (6) Combustion, flames and explosions of gases, second edition, Bernard Lewis and Guenther von Elbe, (1961), 220-261.
- (7) A.G. Gaydon and H.G. Wolfhard, Flames their structure, radiation and temperature, third edition revised, (1970), 15-19.