

炭化水素燃焼成分ガス濃度の空気過剰率による影響

代 淳 吉 朗

Effects of Excess Air Ratio on the Gas-ingredient Concentration of Hydrocarbon Fuel Combustion

Junkichiro DAI

Summary: This paper describes the theoretical study of the effects of the excess air ratio on the gas-ingredient concentration of dry products made by hydrocarbon fuel combustion.

The author attempts to employ solid figures, and the ingredient concentration can be expressed in the form of a performance surface with regard to the burning rate of carbon or hydrogen, fuel composition and the excess air ratio.

When the previous considerations are applied to this surface, a similar trend can also be revealed owing to the excess air variation.

In general, the concentration surface of oxygen, nitrogen, or other produced gases gradually approaches the rich or weak limit plane, as the excess air ratio increases.

The particular lines which are independent of the excess air ratio lie on the nitrogen-specified plane. That is to say, with variation of feed air, the nitrogen concentration surfaces turn on these lines as their rotating axes.

Therefore, it should be noted that, on the side of a complete combustion zone, nitrogen concentration decreases, as the excess air ratio increases. In the case of the carbon reduced, this tendency is evidently observed in the isosceles prismatic figures.

When supply air quantity is scarce, the combustion performance is unexpectedly deteriorated, in case the method "B" is employed.

When the excess air ratio is less than one, the concentration surface forms can markedly affect the particular line of nitrogen, and the length included in these surfaces depends upon the value of the excess air ratio.

Key Words: Hydrocarbon Combustion, Ingredient Concentration, Excess Air Ratio, Solid Figure, Working Performance

1. 緒 言

炭化水素燃焼の理論的解析の一法として物質収支に焦点を当て供給空気量表示を異にする二種の燃焼方程式を基準にこれから誘導される燃焼ガス諸状態量の動的特性を具体的に表現することを主目標に置き、これまで立体図形を使用し^{1)~4)7)~13)}数次にわたりその性能の解明に努めてきた。

しかしながら、これら状態量の中核を占める成分ガス含有率についてはその構成主要素である燃料組成比あるいは空気過剰率はともに一部を除いてそれぞれ極限值を取り上げた経緯もあり、供給空気量の推移に伴う各ガス濃度の変遷に関してはそれ程綿密に検討を加えていなかったように考えられる。

これらのことから本稿では普遍的燃料を用いた際に空気過剰率の変化によるかわき燃焼ガス中の成分ガス含有率の動向を明確に図示追究するとともにできる限

りその特性の実用面への反映をはかってみた。

2. 基礎要項

2・1 基本式^{1)~3)5)~12)15)}

方式A: 不完全燃焼を基準にしたもの

$$C_m H_n + \lambda \{ (m/2)(\alpha + x - z - m'u + v) + (n/4)y \} \\ (O_2 + dN_2 + eA_r) = (1 - \alpha) C_m H_n + m \{ xCO_2 + (\alpha - x - z - m'u)CO + zC + uC_m H_r + vNO \} + (n/2) \{ yH_2O + \{ \alpha - y - n'u(m/n) \} H_2 \} + \{ (m/2)(\alpha + x - z - m'u + v) + (n/4)y \} \{ (\lambda - 1)O_2 + \lambda (dN_2 + eA_r) \} - (m/2) vN_2 \quad (1)$$

方式B: 完全燃焼を基準にしたもの

$$C_m H_n + \mu \{ m + (n/4) \} (O_2 + dN_2 + eA_r) = (1 - \alpha) C_m H_n + m \{ xCO_2 + \alpha - x - z - m'u \} CO + zC + uC_m H_r + vNO + (n/2) \{ yH_2O + \{ \alpha - y - n'u(m/n) \} H_2 \} + [\mu \{ m + (n/4) \} - \{ (m/2)(\alpha + x - z - m'u + v) + (n/4) \}]$$

$$y\}O_2 + \mu\{m + (n/4)\}(dN_2 + eAr) - (m/2)vN_2 \quad (2)$$

ここに C_mH_n : 燃料の分子式 C_mH_n : 生成炭化水素の見掛けの分子式 u : 同モル数 v : NOのモル数
 α : 燃焼割合 x : 炭素の完全燃焼度 y : 水素の完全燃焼度 z : 炭素の遊離析出度 λ : 方式Aの空気過剰率 $\infty \geq \lambda \geq 1$ μ : 方式Bの空気過剰率 $\infty \geq \mu \geq 1$
 $\alpha + x - z - m'u + v + (r/2)y / \{2 + (r/2)\}$ $r = n/m$: 燃料組成比 d : 窒素酸素容積比 (空気) e : アルゴン酸素容積比 (空気) h : 酸素容積含有率 (空気)

2・2 成分ガス含有率

式(1), (2)を基準にするとかわき燃焼ガスにおける各成分ガスの容積含有率は前各報²⁾³⁾⁵⁾⁻¹⁵⁾と同様次のように表わされる。

方式A:

$$[O_2] = (\lambda - 1)\{\alpha + x - z - m'u + v + (r/2)y\}/a \quad (3)$$

$$[N_2] = [\lambda d\{\alpha + x - z - m'u + v + (r/2)y\} - v]/a \quad (4)$$

$$[Ar] = \lambda e\{\alpha + x - z - m'u + v + (r/2)y\}/a \quad (5)$$

$$[N_2]_1 = [N_2] + [Ar] \quad (6)$$

$$[CO_2] = 2x/a \quad (7)$$

$$[CO] = 2(\alpha - x - z - m'u)/a \quad (8)$$

$$[H_2] = \{r(\alpha - y) - n'u\}/a \quad (9)$$

ここに $[N_2]_1$: 空気窒素含有率

$$a = (2/m)(1 - \alpha) + (1 + r)\alpha - x - z - (m + n - 2)u - 3(r/2)y + \lambda(1/h)\{\alpha + x - z - m'u + v + (r/2)y\}$$

方式B:

$$[O_2] = \{\mu\{2 + (r/2)\} - \{\alpha + x - z - m'u + v + (r/2)y\}\}/b \quad (10)$$

$$[N_2] = \{\mu d\{2 + (r/2)\} - v\}/b \quad (11)$$

$$[Ar] = \mu e\{2 + (r/2)\}/b \quad (12)$$

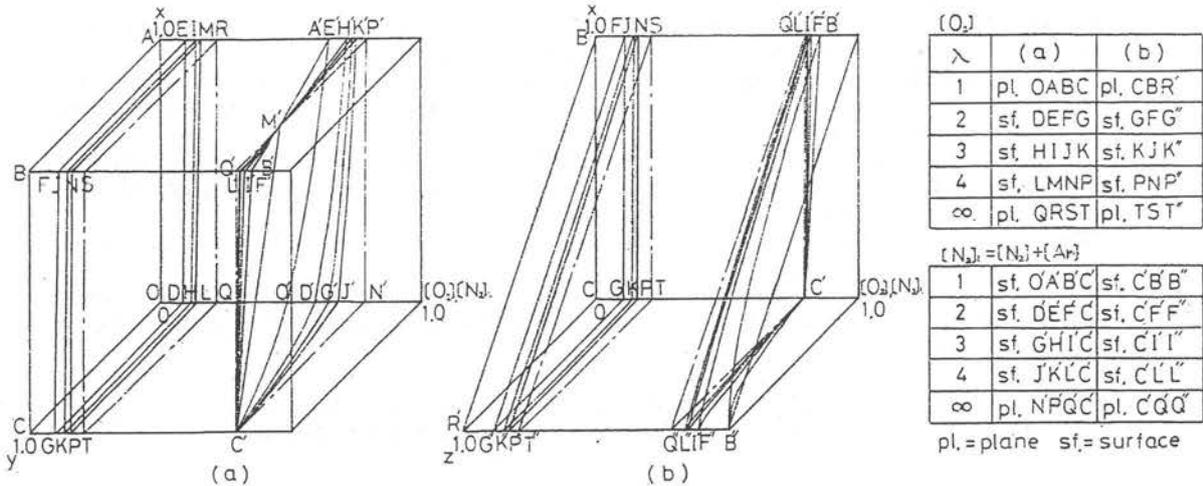


Fig. 1 $[O_2]$, $[N_2]_1$ surface in method "A"

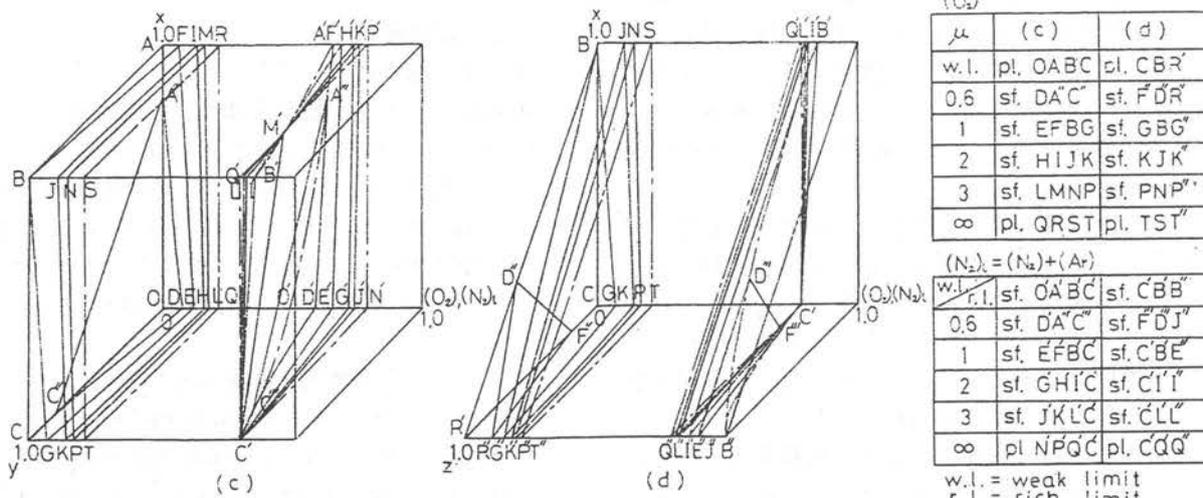


Fig. 2 $[O_2]$, $[N_2]_1$ surface in method "B"

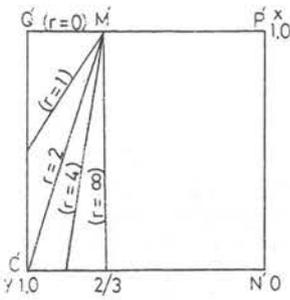


Fig. 3 N₂ particular line performance

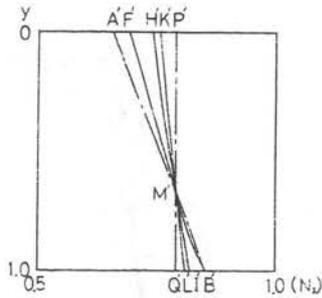


Fig. 4 Detail of upper plane for (N₂)₁ surface with (N₂)₁ double scaled

λ, μによる変化の様子は図1, 2, 7~14のようになる。一般にλ, μの増大に伴うガス含有率を示す曲面の動きはこれまで述べて^{1)~4)11)}きたように最初は大きいのが次第に小さくなっていく。また各図においてλ, μが極大または極小値をとる場合には方式に関係なく各ガス含有率曲面は高限あるいは低限曲面となる^{9)~12)}が、完全燃焼点でλとμとの値が一致することも前提として挙げられる。

$$(N_2)_1 = (N_2) + (A_r) \quad (13)$$

$$(CO_2) = 2x/b \quad (14)$$

$$(CO) = 2(\alpha - x - z - \acute{m}u)/b \quad (15)$$

$$(H_2) = \{r(\alpha - y) - \acute{n}u\}/b \quad (16)$$

ここに (N₂)₁: 空気窒素含有率

$$b = (2/m)(1 - \alpha) + (1+r)\alpha - x - z - (\acute{m} + \acute{n} - 2)u - 3(r/2)y + \mu(1/h)\{2 + (r/2)\}$$

なお作図に当っては標準的燃料としてr=2, 簡易化の面でα=1.0 u=0, v=0としたほか便宜的に各図において(a), (c)ではz=0としたがこれは予混合燃焼を, また(b), (d)ではy=1.0と置いたがこれは拡散燃焼にそれぞれ該当するものと考えられてくる。

3. ガス含有率の動特性

式(3)~(16)で示される各成分ガス含有率の空気過剰率

3・1 酸素および窒素

酸素および空気窒素(以下窒素と略す)含有率の状態は図1, 2で示される。このうち酸素については前報^{2)3)7)~12)}で述べたのと同様, 空気過剰率を換えると空気量の増加につれて[O₂], (O₂)各曲面はこの値が零である低限平面OABC, CBR'からこれが最高値となる標準空气中的酸素含有率である特定平面すなわち高限平面QRST, TST'に向かってそれぞれ移行してゆく。ここで図1の点F(λ=2)と図2の点J(μ=2), 図1の点J(λ=3)と図2の点N(μ=3)のように完全燃焼の場合にはλとμとの値の一致が見られる。なお[O₂], (O₂)各曲面は概して平面に近い形状を呈することがわかる。

窒素の場合にはこれら酸素のものとかなり趣を異にし前報^{2)3)8)~12)}で触れたように図1(a)の[N₂]₁, 図2

Table 1 Classification of performance surface at 1 > μ

(c)		(d)	Form
r > 2	r ≤ 2		
1) μ(1+r/2)/(2+r/2) (1+r/2)/(2+r/2) ≥ μ > 2/(2+r/2) 2/(2+r/2) ≥ μ) 1/(2+r/2) 1/(2+r/2) = μ	1) μ) 2/(2+r/2) 2/(2+r/2) ≥ μ > (1+r/2)/(2+r/2) (1+r/2)/(2+r/2) ≥ μ > 1/(2+r/2) 1/(2+r/2) = μ	1) μ(1+r/2)/(2+r/2) (1+r/2)/(2+r/2) ≥ μ > (r/2)/(2+r/2) (r/2)/(2+r/2) = μ	Pentagon Quadrilateral Triangle Point

Table 2 Properties of N₂ particular line at 1 > μ

r ≥ 2	r < 2	State
2/3) μ (2+r/3)/(2+r/2) ≥ μ ≥ 2/3	2/(2+r/2) μ (2+r/3)/(2+r/2) ≥ μ ≥ 2/(2+r/2)	Nonentity Partial length
μ(2+r/3)/(2+r/2)		Full length

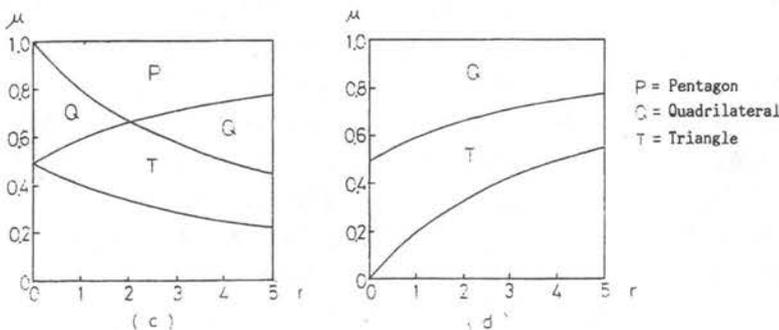


Fig. 5 Forms of performance surface at 1 > μ

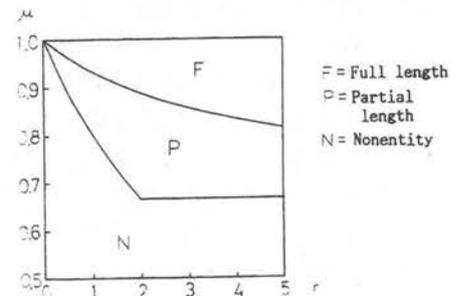


Fig. 6 Properties of N₂ particular line at 1 > μ

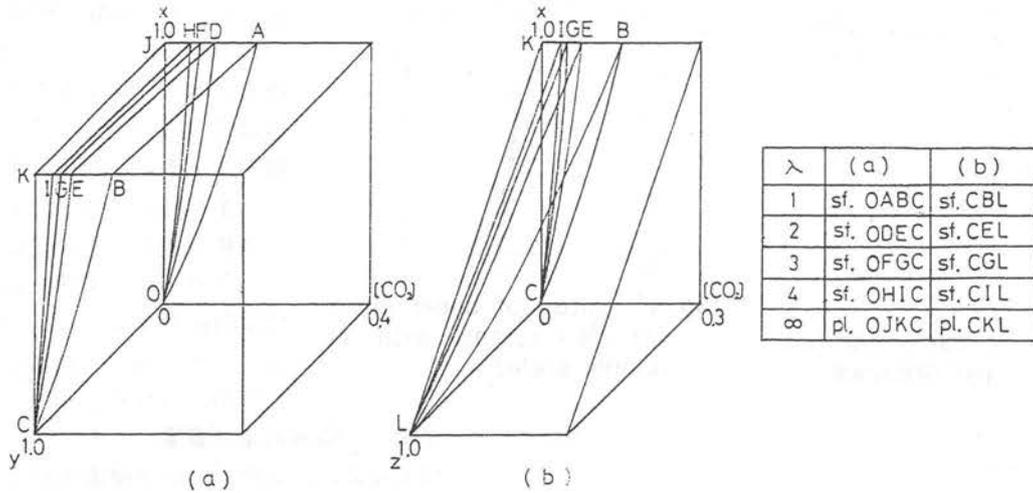


Fig. 7 [CO₂] surface in method "A"

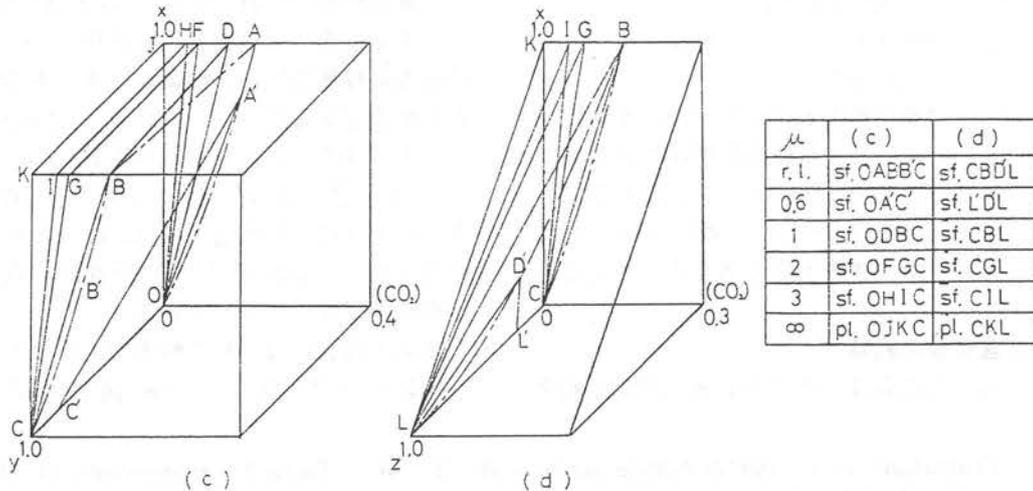


Fig. 8 (CO₂) surface in method "B"

(c) の (N₂)₁ 各曲面はすべて標準空気中の空気窒素含有量に当たる特定平面 N'P'Q'C' 上の λ または μ に無関係な特有直線 C'M を通り空気量の増大につれてこれを軸に上方から見て時計方向に回転する。すなわち (N₂)₁, (N₂)₂ 各曲面は低限曲面 O'A'B'C' から次第に高限曲面である上記特定平面 N'P'Q'C' に近づいてゆくが、厳密に云えば上の特有直線 C'M を境に O'A'B'C' の一部の曲面 C'MB' は高限曲面に、N'P'Q'C' の一部を占める平面 C'MQ' は低限平面にそれぞれ転換することになる。要するに特有直線から完全燃焼にかけての領域では空気量の増加とともに窒素含有率は却って減少することがわかる。この特性は炭素の析出に伴いさらに助長され図 1 (b), 図 2 (d) で見られるように (N₂)₁, (N₂)₂ 各曲面は空気量の増大とともに高限曲面 C'B'B'' から低限に当たる特定平面 C'Q'Q'' に基線上

の点 C' を支点として回転する。これらの性質は実測に際し特に注意しなければならない事項と考えられる。

なお上記特定平面上の特有直線の燃料組成比 r による変化状態は既述⁹⁾¹¹⁾してあるが、参考のため図 3 で再度呈示することにする。ここで図 4 は図 2 (c) の上面を詳述したもので (N₂)₁ の尺度を倍にとり、低限曲線 A'B' と $\mu = 1$ の曲線 F'B' とが点 B' で一致することから低(高)限曲面 O'A'B'C' と $\mu = 1$ の曲面 E'F'B'C' とが、さらに図 2 (d) においては高限曲面 C'B'B'' と $\mu = 1$ の曲面 C'B'E'' とがそれぞれ曲線 C'B' 上で合致することが理解できる。

さて方式 A では $1 \ngtr \lambda$ であるため特に問題はないが、方式 B においては $1 > \mu$ の場合が比較的多く存在しており既報^{9)~12)}でも多少取り上げてはいるが、ここで改めて詳細に検討を加えてみることにする。一般に $1 >$

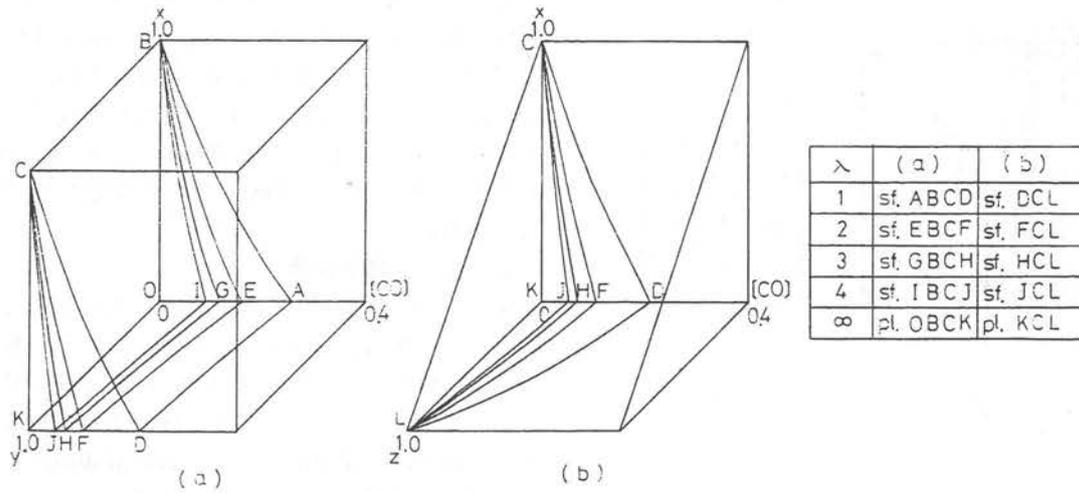


Fig.9 [CO] surface in method "A"

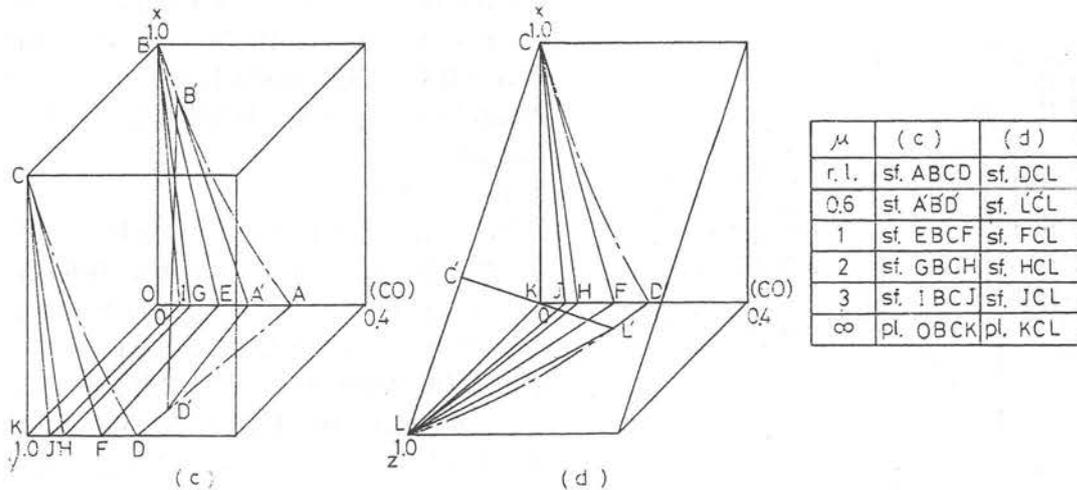


Fig.10 (CO) surface in method "B"

μ においては各ガス含有率曲面は図(c)ではx-y全面, 図(d)ではx-z全面に広がらず燃焼度の高い部分が一部欠如してくる。すなわち図(c)では $x=0, y=0$ (d)では $x=0, z=1$ の各軸上に常に頂点があり, 低限あるいは高限曲(平)面上に一辺を有する三, 四, 五角状曲面としてそれぞれ表わされる。この際 r と μ との関係は表1で表わされこれを図示すると図5のようになる。図5において炭素析出がない(c)の場合には r の低い高炭素燃料では空気量がある程度以上存在しないと燃焼を起こさないことを示し, 炭素が析出する(d)の場合においては高炭素燃料でかつ空気を少なくしたほうがより炭素が析出し易いことを明確に表わしている。(c)を見ると一般に2を境に r がふえれば曲面が四角状となる μ の範囲は広がるが, 五角または三角状を呈する μ の幅は次第に狭くなるとともにこれ

らの下限に当たる μ の値は漸減の傾向にあつて低炭素燃料になるほど空気量が少なくて済むことを示している。ここで $r=0$ (純炭素)は四角状のみで, 対照的に $r=2$ のものは五, 三角状に限られることがわかる。 $1 > \mu$ の代表的な一例として $\mu=0.6$ の場合を各図に提示してみたが, この程度の μ であっても $r=2$ とすると $x+y=0.8, z=x+0.2$ となり x, y は予想外に低く空気不足が燃焼劣化に著しい影響を与えることがわかる。これは図2では $(O_2), (N_2)_1$ についてそれぞれ(c) $DA''C'', D'A''C''$ (d) $F''D''R'', F''D''J''$ 各曲面として示される。

次にこれら $1 > \mu$ の場合における $(N_2)_1$ 曲面と特有直線との関係について考えてみる。上述したようにこの際, $(N_2)_1$ 曲面は燃焼度の高い個所が欠如してくるためこの部分が特有直線に掛からなくなる。この状態

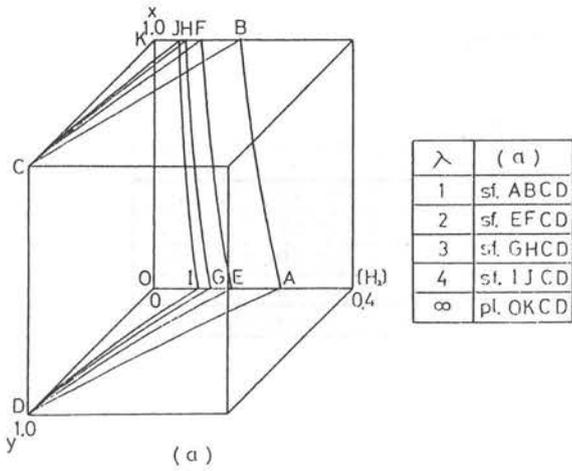


Fig.11 [H₂] surface in method "A"

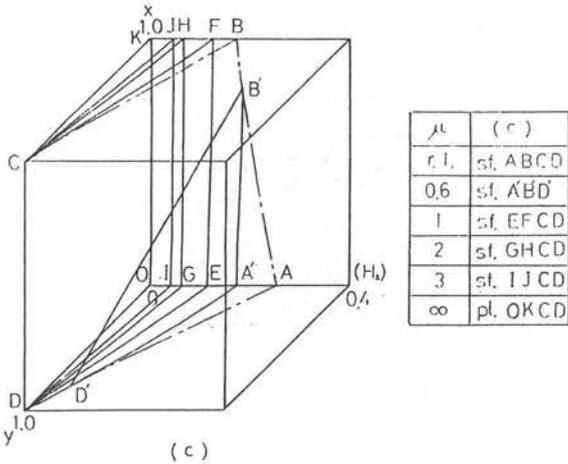


Fig.12 (H₂) surface in method "B"

を表わしたものが表2であってこれを具体的に作図してみると図6のようになる。ここでもrとμとは密接な関係にあり、rの増加につれて特有直線全長を包含できる曲面のμの範囲は広がるが、一部のみに止まる領域はr=2までは広がりこれ以上では下限が一定値に抑えられるためむしろ漸減の傾向を示す。なおr<2では図3に見られるように特有直線自体の長さが短くなっていくため曲面がこれから外れる可能性がかなり高くなる。

3・2 炭酸ガス

[CO₂], (CO₂) 各曲面については前報^{23)37)~12)}でも多少述べたが、さらに敷衍したものが図7, 8であって、空気量の増大とともに底辺OC, CLを軸に高限曲面OAB(B')C, CB(D')Lから低限平面OJKC, CKLに立上りつつ徐々に移行する。一般に[CO₂],

(CO₂) 各曲面はx, zに大きく左右されるが、yの影響は比較的少ないことがわかる。この場合も完全燃焼点でλとμとの一致が見られる。図8ではμ=0.6として(c)高限曲面上に一边A'Cを持つ三角状曲面OA'C'(d)辺D'L'が高限曲面上にある三角状曲面LD'L'がそれぞれ示され、これらは完全燃焼からかなり遠のいていることがわかる。

3・3 一酸化炭素

図9, 10のように[CO], (CO)の各曲面は炭素が析出しない場合には前報¹³⁾と同様、辺BC, 析出する時には前報³⁾⁸⁾¹⁰⁾¹²⁾と同様、辺CLを要に空気量の相違によって下方に広がる形態を示す。空気過剰率の増加により曲面は上記BC, CLを軸に高限曲面ABCD, DCLから低限平面OBCK, KCLに向かい次第に狭まってゆく動きをする。ここでyの曲面への影響は方式AのほうがBに比べて多少大きいことが認められる。μ=0.6のものは図10の(c)では高限曲面上の辺B'D'を有する三角状曲面A'B'D', (d)ではL'C'を高限曲面上の一边とする三角状曲面L'C'L'としてそれぞれ示される。

3・4 水素

[H₂], (H₂)各曲面については前報¹³⁾と同様な方法で図11, 12に示してある。本曲面は一酸化炭素の図9, 10のものとはやや形を異にし、完全燃焼線CDを要にyの減少につれて先方に広がる形状となる。一般に空気過剰率の増加に伴い曲面はCDを軸に高限曲面ABCDから低限平面OKCDに向かい左方に回転してゆくことがわかる。ここで注目されることは図12に見られるように方式Bにおいてxの変動は水素の含有率にほとんど影響を与えないことである。なおμ=0.6のものは高限曲面上に辺B'D'を有する三角状曲面A'B'D'として示される。

3・5 未燃ガス

かつて一酸化炭素と水素とを合わせて未燃ガスとして取り扱った¹⁾²⁷⁾⁹⁾¹¹⁾ことがあるが、本稿でもこの線に沿って考察を進めてみる。図13, 14においてまず気付くことは図9~12と相違し[CO]+[H₂], (CO)+(H₂)各曲面は何れも完全燃焼点Cに集約されることである。空気過剰率を異にするこれら曲面はここでも点Cを支点に空気量の増加により高限曲面ABCD, DCQから低限平面ONCP, PCQに向かってあたかも回転するような動きをする。本曲面は一酸化炭素と水素の特質を合わせ持つ関係もあり、図14においては図12で見られたxについての影響が幾分か薄らいできていることがわかる。なおμ=0.6の曲面として図14で

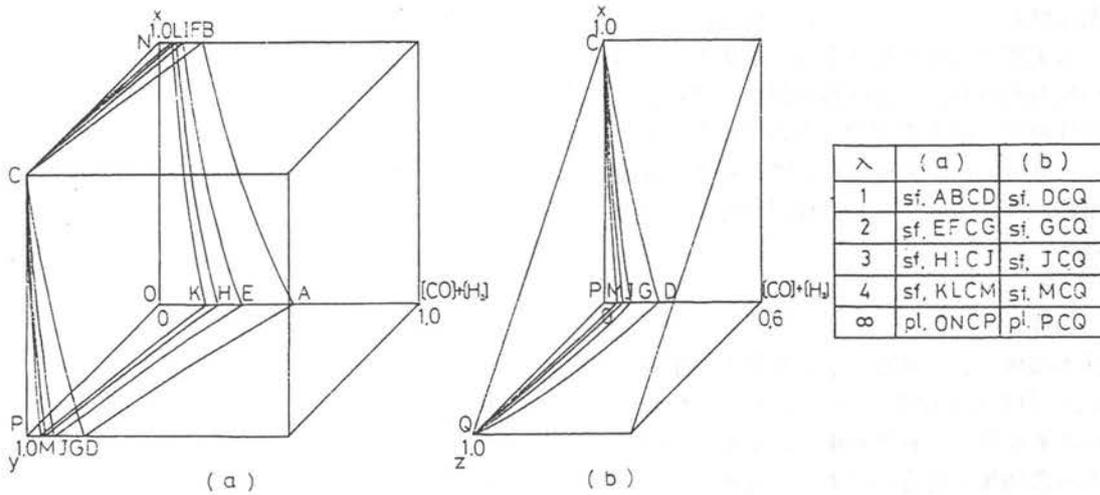


Fig.13 $[\text{CO}]+[\text{H}_2]$ surface in method "A"

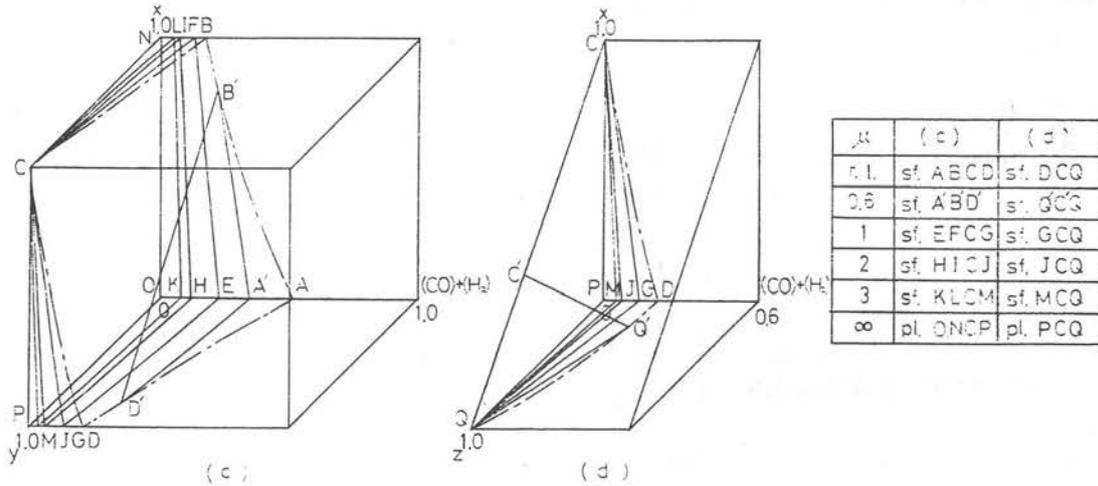


Fig.14 $(\text{CO})+(\text{H}_2)$ surface in method "B"

は(c)高限曲面上に一边 $B'D'$ を有する三角状曲面 $A'B'D'$, (d)辺 $Q'C'$ が高限曲面上に存在する三角状曲面 $Q'C'Q$ とがそれぞれ示してある。

4. 結 言

以上を取りまとめてみると大よそ次のようになる。
 (1) 立体図形を適用する際設定した、炭素が析出しない場合すなわち図(a), (c)は予混合燃焼に、析出するとした図(b), (d)は拡散燃焼にそれぞれ相当するものと考えられる。
 (2) 一般に空気量の増加、言い換えると空気過剰率の上昇に伴い生成成分ガスの濃度は当然徐々に減少してゆくが、酸素のみは増大し、一方窒素のものは空気過剰率に無関係な特有直線を境に完全燃焼の近傍では却って減少する。この性質は炭素析出の場合には助長

される。

(3) 方式Bの $1 > \mu$ の場合には成分ガス含有率各曲面は燃焼度の高い部分が欠如される形状を示し、その比率は予想外に大きく空気不足が燃焼劣化に著しい影響を与えることが改めて確認された。

(4) 上記、各曲面の形態は通常 μ の低下に伴い五角状から三角状に変移してゆくが、燃料組成にも関連し $r=0$ のものは四角状である一方 $r=2$ ではこれを欠く等の特質が見られる。

(5) これらはまた高炭素燃料が燃焼するためには空気がある程度以上必要であり、一方空気量が少なくなるほど炭素が析出し易いこと等を明白に表わしている。

(6) 窒素特定平面上の特有直線についても μ の減少とともに上記曲面が本直線から外れる割合が次第に高くなる。

本稿では先に触れたようにいくつかの仮定に従ったため必ずしも実際の燃焼現象を十分に解明したとは云い切れない節もあったが、定性的な面から見れば、多少でもその性能の一端を追究できたのではないかと推察している。今後何とか実機に即応できるよう精度ならびに適用範囲等についてさらに検討を加えてゆきたいものと考えている。

5. 謝 辞

本論文は日本機械学会、精密工学会共催の山梨講演会（H 8.10.26 山梨大工学部）オーガナイズドセッション（熱とエネルギーの有効利用）において発表¹⁶⁾する内容にさらに加筆したものであり、発表に際して再三にわたり資料作成にご協力下さった機械工学科山下 進教官ならびに英文に目を通していただいた白鷗大学大瀧 眞教授（本校名誉教授）にここで改めて厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 代 淳吉朗, 小山高専研究紀要, (4), 29 (1972)
- 2) 〃, 〃, (5), 47 (1973)
- 3) 〃, 〃, (6), 45 (1974)
- 4) 〃, 〃, (7), 32 (1975)
- 5) 〃, 〃, (24), 123 (1992)
- 6) 〃, 〃, (26), 81 (1994)
- 7) 〃, 日本機械学会講演論文集, 730—5, 77 (1973)
- 8) 〃, 〃, 740—5, 25 (1974)
- 9) 〃, 〃, 740—16, 151 (1974)
- 10) 〃, 〃, 780—6, 138 (1978)
- 11) 〃, 燃料協会誌, 59, (642), 849 (1980)
- 12) 〃, 〃, 60, (646), 95 (1981)
- 13) 〃, 〃, 62, (670), 144 (1983)
- 14) 〃, 〃, 66, (718), 143 (1987)
- 15) 〃, 山梨講演会講演論文集(日本機械学会, 精密工学会), 186 (1993)
- 16) 〃, 〃 (〃, 〃), 151 (1996)

(受理年月日 1996年 9月27日)