立体図形による炭化水素燃焼の一表示法(Ⅱ)

—1980. 11. 26 受理—

小山工業高等専門学校 代 淳吉朗

1. 緒 言

前報¹⁾においては、取り扱いの便あるいは機器の設計運用に資するため、炭素の析出を考慮外において燃料および空気の広い変域にわたり、立体図形を使用して燃焼工学上の各種特性の具体化ならびに新提案の空気表示法の成果の確認などを行ってきたが、本報では、炭素の析出を主眼点におき、前回とほぼ同一手法により解析を進めることとした。この際、煩雑を避ける意味からすでに述べたように水素は完全燃焼という前提条件を設けたが、炭素の燃焼度 x と析出度 z との間には Fig. 16* の関係が常に存在するため今までの直方体図形に対し、二等辺三角柱表示がより適正と認められたので、終始これの準用をはかった。

2. 理論空気量

前報と同様、 $\lambda=1, \mu=1$ の場合の燃料単位量 $[\text{Nm}^3, \text{kgf}]$ 当りの空気量 $[\text{Nm}^3]$ が理論空気量であり、次の各式で与えられる。

方式A:

$$l_o = (1/0.210) \{ (m/2)(1+x-z) + (n/4) \} \quad [\text{Nm}^3/\text{Nm}^3] \dots\dots (48)^{**}$$

$$L_{ov} = (22.413/2)(1/0.210) \{ 1+x-z + (\varphi/2) \} / (12+\varphi) \quad [\text{Nm}^3/\text{kgf}] \dots\dots (49)$$

方式B:

$$a_o = (1/0.210) \{ m + (n/4) \} \quad [\text{Nm}^3/\text{Nm}^3] \dots\dots (7)$$

$$A_{ov} = (22.413/2)(1/0.210) \{ 2 + (\varphi/2) \} / (12+\varphi) \quad [\text{Nm}^3/\text{kgf}] \dots\dots (8)$$

すなわち方式Bのものは方式Aが $x=1.0, z=0$ をとった場合に相当し、前報のものと同一型となる。これらは Fig. 17 に示され、方式Aのものは三角形平面 ABC (φ 平面)、方式Bのものは点Bで表わされることがわかる。いまこの平面 ABC が $z-l_o, L_{ov}$ 平面となす角を α とすれば、 α は m または φ の関数^{***} であって m の減少あるいは φ の増大につれて大きくなる。たとえば、 $m=0$ 、または $\varphi=\infty$ の場合には

Fig. 16 Relation between x, z and $1-x-z$

	l_o, L_{ov}	l_o, L_{ov}	l_o, L_{ov}
(a)	DBCE	ODECGF	DABC
"	ABCE	ODECGF	DAEC
(b)	OE'GF	DABCGE	ODE'G
"	DE'GF	DABCGE	ODFG
(c)	ABCE	DAECGF	ODFG
(d)	OE'GF	ODBCGE	DABC

Fig. 17 Diagrammatic arrangement of stoichiometric and partial air

* $z, 1-x-z$ の各尺は入れ替えても何らさしつかえない。

** (48), (49), (50)……(70), (71)……(74)の各式は前報の式(5), (6), (9)……(29), (32)……(35)にそれぞれ対応する。

*** Fig. 17において $x=1.0$ と $l_o=20$ または $L_{ov}=20$ の長さが等しく置いてあるから
 $\alpha = \tan^{-1}(8.4/m)$
 $\alpha = \tan^{-1}\{8.4(12+\varphi)/22.413\}$

 Fig. 19 O_2 and N_2 concentration surface in method "A"

 Fig. 20 O_2 and N_2 concentration surface in method "B"

面*を基に高限となる特定平面 $G'HI'$ に向いそれぞれ右方に移行するが、窒素のかわきガスにおいては $\infty \geq \phi > 2$ の場合、趣を異にし平面 $L'M'N'$ を含む一連の曲面が高限となり、これからこの際低限になる特定平面 $G'HI'$ に向って左方に移動することになる。また $2 \geq \phi \geq 0$ においては、これらは特定平面との交線を軸に前報と同様、時計方向に回転する性質がある。その代表例として特に $\phi=1$ のものを Fig. 21, 22に取り上げてみた。両図において曲面 $G'JI'$ 、基準曲面 $G'M'I'$ および各高限曲面** $L'M'N'$ はいずれも特定平面 $G'HI'$ 上の線分 PQ を通過している。

* いずれも線分 LN を底辺とする曲面 $LHI'N$ から平面 LMN までのものを指す。

** 厳密には特定平面より左方の部分 L/PQ は低限曲面となるが、紛らわしくなるので名称はそのままとする。

いい換えると、この範囲内では ϕ を同一とする曲面は方式および空気過剰率にまったく無関係に、すべて特定平面上の特有直線と交叉する通性があり、とくにこれを端的に表わしたのが Fig. 23 であって、 ϕ のこの領域では特定平面は特有平面と完全に合致することを示す。これらの事項は前報の Fig. 5, 7, 8 とほぼ類似の性質といえよう。本稿においても、これらの諸性能は、状態をこの付近にもっていけば、少量の空気で多量の場合と同等の運転も可能であること、あるいは窒素濃度のみからの空気量の推定は避けるべきことなど操作計測両面に前記同様の教示を与えてくれる。なお Fig. 21, 22 においても Fig. 19, 20 と同じく窒素の低、高限各曲面である LMN および $L'M'N'$ のそれぞれの一致が見られる。また Fig. 22 で示されるように、方式 B の $1 > \mu$ の場合には、 ϕ 曲面は $z=1$ の線上に常に頂点があり、かつ低限または高限曲面上に

Fig. 21 Typical example of O_2 and N_2 content surface in method "A" Fig. 22 Typical example of O_2 and N_2 content surface in method "B" Fig. 23 N_2 specified and particular plane for dry productsTable 3 Classification of performance surface with $1 > \mu$ in method "B"

μ	Form	Remark
$1 > \mu > \frac{2+\phi}{4+\phi}$	Quadrilateral	one side always on the $z=0$ plane
$\frac{2+\phi}{4+\phi} \geq \mu > \frac{\phi}{4+\phi}$	Triangle	
$\mu = \frac{\phi}{4+\phi}$	Point	on the $z=1$ line

一辺をもつ三角状あるいは四角状曲面で表わされ、その状態は Table 3 にあげたとおりである。

5.2 炭酸ガス

方式 A : $[CO_2]_v = 2x/a$ [—]……(67)

$[CO_2']_v = 2x/a'$ [—]……(68)

方式 B : $(CO_2)_v = 2x/b$ [—]……(69)

$(CO_2')_v = 2x/b'$ [—]……(70)

Fig. 24 は方式 A, Fig. 25, 26* は方式 B に関するもので前報と同様任意の ϕ の高限および基準各曲面を取り上げてある。これらはいずれも z 軸を底辺とし、5.1 と同様 ϕ あるいは x の大きいものほどその曲率は小さく、 λ または μ の増大により次第に立上り $x-z$ 平面に近接する性質がある。 $x-z$ 平面は $\phi=\infty$ における全曲面、 ∞ 以外のものの低限曲面を兼ねる事実、あるいは B 方式においては基準、高限両曲面の完全燃焼線上での合致、さらに $1 > \mu$ の状態での x 上限の制約**など、ここでも前報 6.2 がそのまま当ては

* 図の明確を期するため(a), (b)に分割した。

** この場合、いずれも三角状曲面で示されるが $(2+\phi)/(4+\phi) > \mu > \phi/(4+\phi)$ では底辺(z 軸)の下限が制限され、また $\mu = \phi/(4+\phi)$ では曲面は点 (C) となる。

 Fig. 24 CO₂ content surface for method "A"

 Fig. 25 One example of CO₂ content surface for method "B"

 Fig. 26 Typical example of CO₂ content surface for method "B"

まる事項を見受ける。その他 Fig. 24 の曲面 OABC, ODC, OD'C に対し, Fig. 25 の OFABC, Fig. 26 の OFDC, OFD'C の各曲面がそれぞれ一致することから一般に, この場合高限曲面は方式に左右されないことを知る。なお炭酸ガス含有率の最大値は次のように前報のものとまったく一致する。

$$\begin{aligned}
 [\text{CO}_2]_{v \max} &= 4 / [\varphi \{ (1/0.210) + 1 \} + (4/0.210)] \\
 &= (\text{CO}_2)_{v \max} \quad [—] \cdots \cdots (30)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 [\text{CO}'_2]_{v \max} &= 4 / [\varphi \{ (1/0.210) - 1 \} + (4/0.210)] \\
 &= (\text{CO}'_2)_{v \max} \quad [—] \cdots \cdots (31)
 \end{aligned}$$

5.3 一酸化炭素

$$\text{方式 A : } [\text{CO}]_v = 2(1-x-z)/a \quad [—] \cdots \cdots (71)$$

$$[\text{CO}']_v = 2(1-x-z)/a' \quad [—] \cdots \cdots (72)$$

$$\text{方式 B : } (\text{CO})_v = 2(1-x-z)/b \quad [—] \cdots \cdots (73)$$

$$(\text{CO}')_v = 2(1-x-z)/b' \quad [—] \cdots \cdots (74)$$

本報の場合, 未燃ガスは一酸化炭素のみとなり, これを図示したのが Fig. 27, 28 であって任意の φ の高限または基準曲面が記載してある。図からわかるように曲面はいずれも斜辺 BC を共通辺として, 5.2 の

場合と同じように φ または x の大きいほど曲率は小さく, λ または μ の増加に伴って次第に立上り $x-z$ 平面に接近してゆく性質がある。また $x-z$ 平面が $\varphi = \infty$ の全曲面, ∞ 以外のものの低限曲面に相当することならびに全般に高限曲面は方式に左右されないことあるいは $1 > \mu$ においては曲面の x 上限が制限*を受けるなどは前項とはほぼ同一である。

5.4 湿り度の影響

今回も前報にない成分ガス含有率の湿り, かわき各状態間の最大差違を求めるため, これをある変量に対して偏微分した値を 0 として得られた二次方程式の正根に他の変量を導入する数値解法を行ってみた。この結果が Table 4 であって最大差違は A, B 各方式に無関係であり, その値は一酸化炭素のもの以外は前報と同値となるが, φ の領域は前報に比べかなり広い

* いずれも三角状曲面で示されるが, $(2+\varphi)/(4+\varphi) > \mu > \varphi/(4+\varphi)$ では共通辺 (BC) の上限 (B 側) が制限を受け, また $\mu = \varphi/(4+\varphi)$ では曲面は点 (C) になる。

Fig. 27 CO content surface for method "A"

Fig. 28 CO content surface for method "B"

Table 4 Maximum difference among the constituents concentration in the dry and wet products

Item	Value	ϕ	λ	μ	x	z	Remark
$[O_2]_v - [O_2]_v$ $(O_2)_v - (O_2)_v$	0.02229861	$\infty \geq \phi > 0$	1.978	$1.978 \left(\frac{\phi}{4 + \phi} \right)$	0	1.0	regardless of x, z with
$[N_2]_v - [N_2]_v$ $(N_2)_v - (N_2)_v$	0.34315305	$\infty \geq \phi > 0$	1.0	$\frac{\phi}{4 + \phi}$	0	1.0	$\phi = \infty$
$[CO_2]_v - [CO_2]_v$ $(CO_2)_v - (CO_2)_v$	0.02229861	$4.091 \geq \phi > 0$	1.0	$1.978 \left(\frac{\phi}{4 + \phi} \right)$	0.244ϕ	$1 - 0.244 \phi$	
$[CO']_v - [CO]_v$ $(CO')_v - (CO)_v$	0.03685721	2.475	1.0	$1.808 \left(\frac{\phi}{4 + \phi} \right)$	0	0	

範囲にわたっていることがわかる。 λ の値は Table 2 と一致しているが、 μ についてはやや形を異にし一般に $\phi/(4+\phi)$ の関数として示され、酸素と炭酸ガスとは同型、また酸素と窒素とは Table 2 のものに $\phi/(4+\phi)$ を乗じた形で表わされる。炭酸ガスの最大値は前報では特定燃料の完全燃焼に該当したが、今回は燃料の種類によって燃焼度が指定されることを意味している。なお計測および推算に際して窒素の湿り度に留意する必要があることは前回と同様である。

6. 実際面への適用

各特性値をガス分析値*によって表わせば、前稿と同じ様に空気関係諸量以外は方式に無関係となる。したがってこの場合方式 A のもので代表させてみたが、 v' , V' については g' , G' と同型のため省略した。

$$\begin{aligned}
 l_o &= (m/0.210)(1/0.790) \{0.210/[CO_2]_{v \max} - 1\} [1 + \{[CO_2]_v + 0.5[CO']_v\} / \{0.5[CO']_v + (1/0.781)[N_2]_v - 1\}] \\
 &= (n/0.210)(1/4) [1 + \{[CO_2]_v + 0.5[CO']_v\} / \{0.5[CO']_v + (1/0.781)[N_2]_v - 1\}] \cdots (75)**
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 L_{ov} &= (22.413/4) \{ (1/0.781)[N_2]_v - (1/0.210)[O_2]_v \} / [2.370 / \{0.210/[CO_2]_{v \max} - 1\} + 1] / \{0.5[CO']_v + (1/0.781)[N_2]_v - 1\} \\
 &\cdots (76)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a_o &= (m/0.210)(1/0.790) \{0.210/(CO_2)_v \max - 1\} [1 + (CO_2)_v / \{ (1/0.781)(N_2)_v - 1 \}] \\
 &= (n/0.840) [1 + (CO_2)_v / \{ (1/0.781)(N_2)_v - 1 \}] \\
 &\cdots (77)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{ov} &= (22.413/4) \{ (1/0.781)(N_2)_v - (1/0.210)(O_2)_v \} / [2.370 / \{0.210/(CO_2)_v \max - 1\} + 1] / \{ (1/0.781)(N_2)_v - 1 \} \\
 &\cdots (78)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 g' &= (m/0.790) \{0.210/[CO_2]_{v \max} - 1\} / \{0.5[CO']_v + (1/0.781)[N_2]_v - 1\} \\
 &= (n/4) / \{0.5[CO']_v + (1/0.781)[N_2]_v - 1\} \\
 &\cdots (79)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 G' &= (22.413/4) / [2.370 / \{0.210/[CO_2]_{v \max} - 1\} + 1] / \{0.5[CO']_v + (1/0.781)[N_2]_v - 1\}
 \end{aligned}$$

** 式(75)⋯(82), (85)は前報の式(37)⋯(44), (47)にそれぞれ対応する。

* かわき燃焼ガス

.....(80)

$$\eta = [1 + \{0.8416[\text{CO}_2']_v + 0.2565[\text{CO}']_v\} / \{0.5[\text{CO}']_v + (1/0.781)[\text{N}_2']_v - 1\}] / [1 + 0.6648 / \{0.210/[\text{CO}_2']_{v \max} - 1\}] \quad \text{.....(81)}$$

$$x = (1/0.790)[\text{CO}_2']_v / \{0.210/[\text{CO}_2']_{v \max} - 1\} / \{0.5[\text{CO}']_v + (1/0.781)[\text{N}_2']_v - 1\} \quad \text{.....(82)}$$

$$z = 1 - (1/0.790) \{ [\text{CO}_2']_v + [\text{CO}']_v \} \{ 0.210/[\text{CO}_2']_{v \max} - 1 \} / \{ 0.5[\text{CO}']_v + (1/0.781)[\text{N}_2']_v - 1 \} \quad \text{.....(83)}$$

$$1 - x - z = (1/0.790)[\text{CO}']_v \{ 0.210/[\text{CO}_2']_{v \max} - 1 \} / \{ 0.5[\text{CO}']_v + (1/0.781)[\text{N}_2']_v - 1 \} \quad \text{.....(84)}$$

$$\lambda = [\text{N}_2']_v / \{ [\text{N}_2']_v - (0.781/0.210)[\text{O}_2']_v \} \quad \text{.....(46)}$$

$$\mu = (0.210/0.781)(\text{N}_2')_v / [0.790 / \{ 0.210/(\text{CO}_2')_{v \max} - 1 \} + 1] / \{ 0.5(\text{CO}')_v + (1/0.781)(\text{N}_2')_v - 1 \} \quad \text{.....(85)}$$

$$(1/0.790) \geq 0.5[\text{CO}']_v + (1/0.781)[\text{N}_2']_v \geq 1 \quad \text{.....(86)}$$

ここで(77)の n に関する式は前報の式(39)のものと、また λ については(46)とまったく一致する。さて(46)、(86)以外の各式はすべて m, n あるいは $[\text{CO}_2']_{v \max}, (\text{CO}_2')_{v \max}$ のいずれかを含んでおり、これは前稿とは異なり、あらかじめ燃料の組成を知っておかなければならないことを意味している。この理由は遊離炭素の燃焼ガス中におけるガス状としての含有率 $[\text{C}']_v$ または $(\text{C}')_v$ を考慮計上しなかったことに基づくが、われわれが通常遭遇する状態において、このようなかなりの高温を伴う錯そうした現象³⁾をいかなる形で表現し、かつどのように対処して行かかが、今後に残された課題であるものと考えている。なお今回も参考までに性能値の共線図表によるいくつかの例示を行い付録とした。

7. 結 言

上記の内容を総括すると大体次のようにいうことができる。

(1) 炭素の析出度を考慮した場合には、燃焼度との相関性からこれを両軸とした二等辺三角柱を使用すると至って便利になる。

(2) 本報でも窒素特有面のもつ特性から、空気量の有効制御法を搬入することができる。

(3) 方式Aは前報に続き空気各関係量表示ならびに取り扱いの両面で長所があることが見受けられた。また前、本報を一貫して空気諸量以外の性能各量は方式に支配されないことも判明した。

(4) 湿り度のガス含有率への影響は、量的には前報

と変わりはないが、本稿では燃料の範囲がきわめて広はんに及んできたので、運転計測に際してはとくにこれに注意を払う必要がある。

(5) ガス分析値による諸性能表示に関しては、 λ を除き燃料組成既知である必要があり、これが前報と対比して本報の最大弱点となっている。

(6) 今回、水素は完全燃焼を前提に置いたが、実際上もほぼこれに近い状態と予想されるので、炭素析出の寡小部分に焦点を合わせ、さらに詳細に解析を加えればある程度、実情に即した結果が得られるものと考えられる。

(7) (I)、(II)報全般を通じて x と y および x と z との両者間にかんがりの共通特質が各所に見出されたので、これらの運用面への反映をはかる意味も含めてさらに連携分野での追究を行ってみる必要を感じる。

今後、高負荷燃焼装置を使用し、これまでの事項をできれば裏付けてゆきたいものと考えている。

〔付 録〕

かわき燃焼ガス分析値より性能値を求める共線図表のいくつかを取り上げてみたが、 λ については前報と同一型となるため省略した。

(1) l_0 Fig. A-10

$\text{CO}_2, \text{CO}_{2 \max}, \text{CO}, \text{N}_2$ の各値を点 A, B, C, D また m, n のものを点 E, F とし、線分 AC, CD と c, a 各尺との交点を G, H、線分 HB の延長が b 尺と交わる点を I、線分 GI と d 尺との交点を J、線分 EJ の延長が e 尺と交叉する点を K とすれば、線分 FK と l_0 尺との交点 L が求める値を示す。

(2) L_{0v} Fig. A-11

$\text{CO}, \text{CO}_{2 \max}, \text{N}_2, \text{O}_2$ の各値を点 A, B, C, D とし、AC, CD と a, c 各尺との交点を E および G, EB の延長が b 尺と交わる点を F, FG と d 尺との交点を H、定点 I と H とを結びこの延長が L_{0v} 尺と交わる点 J が求めるものである。

(3) g', v' Fig. A-12

$m, \text{CO}_{2 \max}, \text{CO}, \text{N}_2$ の値をそれぞれ点 A, B, C, D として CD と a 尺との交点を E, EB の延長が b 尺と交わる点を F, AF と c 尺との交点を G、定点 H と G とを結びこの延長が g', v' 尺と交わる点 I が求める値を表わす。

(4) G', V' Fig. A-13

$\text{CO}, \text{CO}_{2 \max}, \text{N}_2$ のそれぞれの値を点 A, B, C にとり、AC と a 尺との交点を D, DB の延長と b 尺との交点を E、定点 F と E とを結び c 尺との交点を G、定点 H と G とを結び延長が G', V' 尺と交わ

Fig. A-10 Nomogram of l_o Fig. A-11 Nomogram of L_{ov} Fig. A-12 Nomogram of g' and v'

る点 I が所要の値となる。

(5) η Fig. A-14

CO_2 , $\text{CO}_{2\text{max}}$, CO , N_2 の各値をそれぞれ点 A, B, C (2点), D として CD, AC と a, b 各尺との交点を E および F, EF と c 尺との交点を G, 定点 J と G とを結び延長が d 尺と交叉する点を H とすれば,

HB の延長が η 尺と交わる点 I が η の値を示す。

(6) x Fig. A-15

CO_2 , $\text{CO}_{2\text{max}}$, CO , N_2 の各値を点 A, B, C, D とし, CD と a 尺との交点を E, EB の延長と b 尺との交点を F, A と F とを結びば x 尺上の点 G が求める x の値である。

 Fig. A-13 Nomogram of G' and V'

 Fig. A-14 Nomogram of η

 Fig. A-15 Nomogram of x

 (7) z Fig. A-16

CO_2, CO_{2max}, CO, N_2 を点 A, B, C, D とし, CD, AC と a, c 各尺との交点を E, G, EB の延長と b 尺との交点を F とすれば, FG と z 尺との交点 H が z の値を示す。

 (8) x および z Fig. A-17

CO_2, CO の値を点 A, B また x と z との値を点 D あるいは E とする。AB の延長と a 尺との交点を C とすれば, CD の延長が z 尺と交わる点 E が z を, または CE と x 尺との交点 D が x の値をそ

Fig. A-16 Nomogram of z Fig. A-17 Nomogram of x and z

点を E とすれば、CE と μ 尺との交点 F が求めるものとなる。

文 献

- 1) 代 淳吉朗, 燃協誌, **59**, (642), 849 (1980)
 - 2) 燃料協会, “新版燃料便覧 (増補)”, コロナ社, P. 552 (1977)
 - 3) 日本化学会, “化学便覧基礎編 II”, 丸善, P. 848, 853 (1966)
- L. C. Lichty, “Combustion Engine Processes”, McGraw-Hill p. 85 (1967)

れぞれ表わす。すなわち x, z の一方がわかれば他方はおのずから判明する。

(9) μ Fig. A-18

$\text{CO}_2, \text{CO}_{2\text{max}}, \text{N}_2$ のものを点 A, B, C で表わし, AC と a 尺との交点を D, DB の延長と b 尺との交

Fig. A-18 Nomogram of μ

Representation in Solid Figure for Combustion of the Hydrocarbon Fuel (II)

Junkichiro DAI

(Oyama Technical College)

SYNOPSIS :—The mass balance relation of hydrocarbon fuel combustion accompanying carbon formation is considered in the present paper. X and z denote the mole fraction of carbon dioxide and carbon presented respectively.

It is assumed that the hydrogen in the fuel is completely converted into water.

In order to represent the performance of combustion, the solid figure of isosceles prisms is employed.

The patterns of stoichiometric and partial theoretical air planes have similar trends to those in the foregoing report.

In general, concentration surfaces of oxygen and nitrogen shift towards the right as excess air ratio increases.

When hydrogen-carbon ratio is more than 2, the nitrogen surface of dry products removes to the left as excess air increases.

On the specified plane of nitrogen, it should be noted that, in these states, the group of particular lines which is independent of excess air forms identical plane.

It will be found that, with the increase of feed air, carbon dioxide or monoxide surface gradually approaches towards the x - z plane.

The maximum difference among the constituents concentration for dry and wet products, has a trend to obtain the same value in foregoing report, but in this paper this trend is confirmed in the very wide range of fuels.

The series of alignment charts have been constructed by giving the fuel composition. This is a weak point in regard to the treatment.