燃料油の蒸発に関する研究 (II)

——モーターガソリンおよびディーゼル軽油の蒸発速度——

—昭和42年9月26日受理—

山形大学工業短期大学部 千葉 近

1. 緒 言

液体の蒸発の問題は、内燃機関や化学工業における蒸発燃焼などに密接な関係をもっている。急に加熱した単一液粒の蒸発については、すでに、N. Frössling¹⁾、小林²⁾、R. D. Ingebo³⁾、西脇⁴⁾らによつて研究がなされ、純粋液粒およびガソリン滴については、定常蒸発期間では粒径の2乗を時間で微分したもの、すなわち、蒸発速度係数が粒径の大きさに関係せず一定になることが明らかにされたが、本報では、水、モーターガソリンおよびディーゼル軽油の容器からの蒸発について、定常蒸発期間における蒸発速度係数を求め、この実験式および関係式を求める。

2. 基礎理論

W_{f0} : 始めの液体の重量 (mg)

A : 蒸発面積 (cm²)

W_e : 蒸発量 (mg)

W_e/W_{f0} : 蒸発率

$(W_e/W_{f0})/A$: 単位面積当たりの蒸発率 (1/cm²)

$(1-W_e/W_{f0})/A$: 単位面積当たりの蒸発残留油率 (1/cm²)

t : 時間 (min)

θ : 温度 (°C)

k : 定常蒸発初期の蒸発速度係数 (1/cm/min)

k' : 定常蒸発初期以降の蒸発速度係数 (1/cm²)

添字 g, f は外部気体および液体を表わすものとする。ここでは、自然通気のできる定温炉中の容器からの定常蒸発を考える。

軽質燃料油について、定常蒸発初期における蒸発速度式として、次式を用いる。

$$d\left(\frac{W_e}{W_{f0}}/A\right)/dt = k\left(\frac{1-W_e/W_{f0}}{A}\right)^{1/2} \quad (1)$$

この式を解くと

$$2(\sqrt{1/A} - \sqrt{(1-W_e/W_{f0})/A}) = k \cdot t \quad (2)$$

となる。(2)式の左辺は線蒸発率を表わす。この線蒸発率と t の図を画くと、定常蒸発初期において、相当区間直線を示すものと考えられる。蒸発速度の大小は、この直線部分の勾配の大小で表わすのが合理的である。蒸発速度係数 k はこの直線の勾配として求められる。 k は燃料油の種類、外部気体の温度 θ_g 、油の初めの重量 W_{f0} 、圧力などに支配されるものであるが、いまは、自然通気のできる定温炉中の同一燃料油について考えると、 k は W_{f0} と θ_g によつてきまるから

$$k = f(W_{f0}, \theta_g) \quad (3)$$

なる関数で表わすことができる。この関数形はつぎの実験によつて求められる。

つぎに、軽質燃料油の定常蒸発初期以降について考える。この区間では、(2)式による $2(\sqrt{1/A} - \sqrt{(1-W_e/W_{f0})/A})$ と t の図において、直線で表わされない部分であるから、このままでは蒸発速度係数を求めることができない。よつて、この区間については、つぎの関係式から、別に、蒸発速度係数とも呼ばれるべきもの k' を求める。すなわち、同一燃料油について、一定炉温 θ_g のとき、蒸発時間 t 、蒸発率 $(W_e/W_{f0})/A$ および燃料油の始めの重量 W_{f0} の間に、つぎの関係式が存在すると考えられる。

$$t = \exp\{a(W_e/W_{f0})/A\} \cdot F(W_{f0}) \quad (4)$$

ここに、 a は定数、 F は関数記号とする。いま、 $F(W_{f0}) = \text{const.}$ と仮定して、 $\ln t$ について微分すると

$$d\left(\frac{W_e}{W_{f0}}/A\right)/d \ln t = 1/a \quad (5)$$

となる。 $2.302/a = k'$ とおくと

$$d\left(\frac{W_e}{W_{f0}}/A\right)/d \log t = k' \quad (6)$$

すなわち

$$\frac{W_e}{W_{f0}} / A = k' \cdot \log t \quad (7)$$

を得る。したがって、この区間では、 $(W_e/W_{f0})/A$ と $\log t$ の図で表わすとき、得られる直線の勾配として、蒸発速度係数とも呼ばれるべきもの k' を求めることができる。 k' がわかれば、蒸発速度は、(7) 式から

$$d\left(\frac{W_e}{W_{f0}} / A\right) / dt = \frac{k'}{2.302 t} \quad (8)$$

によって求めることができる。

3. 実験装置および方法

実験装置の概要は第 I 報⁵⁾ に準じ、Fig. 1 に示すとおりである。すなわち、供給電力の加減をスライダ

Fig. 1 Schematic diagram of equipment

ック 1 により、電気炉 3 の炉内温度をサーミスタ 5、温度調節器 2 により、精度 $\pm 2^\circ\text{C}$ に調節する。4 は熱天秤（ワイヤー・ション方式、秤量 0~2g、感量 1mg）で、油ダンパにより振動の減衰をはかった。容器（白金のつば、口径および高さおのおの 20mm、厚さ 0.09mm）中に種々の重量の燃料油をとり、自然

通気のできる高温炉中に、急に（加熱開始時間遅れを無視できる程度に）挿入して、燃料油の蒸発減量を熱天秤 4 によつて測定した。供試油はモーターガソリンおよびディーゼル軽油であり、性質は Table 1 のとおりである。

炉の熱容量が大きいので、容器に入れた燃料油を急に定高温の炉中に入れたとき、炉温はほとんど一定とみてよい。

4. 実験結果および考察

4-1. 容器の影響

容器からの燃料油の蒸発においては、容器の材質と液面から容器の縁までの高さが蒸発速度に関与する要因である。

前者については、燃料油の容器からうける熱量 Q_c (kcal/hr) を考慮すべきで、 Q_c は

$$Q_c = K(\theta_g - \theta_f) A_c \quad (9)$$

となる。同一寸法の容器でも、容器の材質（熱伝導率）による影響を無視できない。ここに、 K (kcal/m²hr°C) は容器の熱通過率で、 A_c (m²) は燃料油が受熱する部分の容器の表面積である。

後者については、液面から容器口までの高さを H 、容器の半径を R とするとき、 $R \ll H$ の場合は、蒸発速度に関与する R の代わりに、 $\sqrt{R^2 + H^2} - H$ を用うべきことが知られている⁶⁾。この場合、液面から容器口に向つて、一様に低下する蒸気濃度の勾配が存在する。 R が十分小さければ、管内の空気は静止しており、蒸発速度は管の断面積に比例し、高さに逆比例する。

しかし、本報では、使用燃料油の量は 400mg までとし、 H に対して、 R は十分大きく、蒸発がとくに妨

Table 1 Properties of the fuel oils used

Item \ Classification	Motor gasoline	Item \ Classification	Light diesel oil
Specific gravity	0.731	Specific gravity	0.828
Reaction	neutral	Reaction	neutral
ASTM distillation	10 % (°C)	Flash point (°C)	85
	50 % (°C)	Mean boiling point (°C)	266
	90 % (°C)	Pour point (°C)	-15
	97 % (°C)	Carbon residue (wt. %)	0.01
	E. P. (°C)	Kinematic viscosity (cs)	30°C, 3.2
Copper corrosion	1	Sulphur content (wt. %)	0.85
Reid vapor pressure (kg/cm ²)	0.545	Water content (vol. %)	—
Existent gum (mg/100ml)	2	Ash content (wt. %)	—
Rsearch octane number	90	Cetane number	55

げられないようにした。

蒸発が妨げられない場合には、沸騰熱伝達による伝熱面の形状、寸法、姿勢によって、沸騰曲線（壁面過熱温度 $\Delta\theta_{sat}$ (°F), すなわち、(飽和温度) - (伝熱面表面温度) に対する熱負荷 h (kcal/m²hr) の曲線) にあまり大きい変化が認められないことが、水について認められている⁷⁾⁸⁾ので、油の場合も同様に考えた。

液体を入れない容器を種々の定温の炉中に急に入れて、その重量変化を求めると、高温になるほど、容器のみかけ重量が小さい。以下の実験では、この影響を考えて試料液の正味蒸発曲線を求めた。

つぎに、モーターガソリンおよびディーゼル軽油を容器に入れて、これを定高温の炉中に入れた場合の蒸発変化を求めると、たとえば、Fig. 2, Fig. 3 のごとくになり、実験の範囲では、時間に対する蒸発残留

Fig. 2 Changes of sample weight at the furnace temperature $\theta_g=200^\circ\text{C}$ with motor gasoline

Fig. 3 Changes of sample weight at the furnace temperature $\theta_g=300^\circ\text{C}$ with light diesel oil

量曲線は燃料油の初めの重量に関せず、ほぼ平行とみなすことができる。

4-2. 容器に入れた燃料油を急に一定高温の炉中に入れた場合

容器に入れた燃料油を自然通気のできる一定高温の

炉中に入れた場合、第 I 報のとおり、初期加熱期間は炉温 θ_g と燃料油の初めの重量 W_{f0} によつて異なり、 θ_g が高く、 W_{f0} が小さいほど小さくなる。重質油ほど初期加熱期間が少し長い。また、定常時の油温 θ_f は W_{f0} に関せず一定になる。

いま、定常蒸発期間について、燃料油の蒸発速度係数を求めるために、純粹液体として水、蒸溜油としてモーターガソリン、ディーゼル軽油につき、蒸発速度変化の解析を行なつた。

(a) 水について

容器に入れた水 $W_{f0}=200\text{mg}$, 300mg を炉温 $\theta_g=100^\circ\text{C}\sim 300^\circ\text{C}$ の中に入れたとき、蒸発減量変化は Fig. 4 のごとくになる。ここで、縦座標 $(1 - W_e/W_{f0})/A$ (1/cm²) は単位蒸発面積当たりの蒸発残留油

Fig. 4 Evaporation of water

率である。初期加熱期間はわずか ($t=0.9\sim 2.6\text{min}$) で、それ以後は直ちに定常蒸発期間になり、 $(1 - W_e/W_{f0})/A$ が W_{f0} , θ_g に関せず直線的に減少する。いいかえれば、蒸発速度は直線的に増加をつづける。また、同一 W_{f0} たとえば $W_{f0}=200\text{mg}$ のとき、炉温が高くなると、たとえば、 $\theta_g=100^\circ\text{C}$, 200°C , 300°C のように高くなると、直線の傾斜が次第に大きくなり、蒸発速度が大きくなる。

したがって、一般に、純粹液体では、発生蒸気の逸脱が阻止されない限り、残液の濃度は一定のまま蒸発をつづけ、蒸発残留量が直線的に減少する。すなわち、純粹液体では、蒸発速度は直線的に増加する。

(b) モーターガソリンについて

容器に入れたガソリン $W_{f0}=200\text{mg}\sim 400\text{mg}$ を一例として、 $\theta_g=200^\circ\text{C}$ の炉中に入れたとき、蒸発減量変化は Fig. 5 (A) となる。初期加熱期間は $t \approx 1.5\sim 3\text{min}$. とみなされ、その後は初め蒸発残留分がほぼ直線的にある期間減少し、その後は緩やかな曲線となる。

Fig. 5 (A) Evaporation of motor gasoline at the furnace temperature $\theta_g=200^\circ\text{C}$

これは、定常蒸発の初期のある期間、油の表面近くの油側の温度境界層の濃度差勾配が一定のまま揮発を行なうので、(a) の場合のごとく、蒸発残留量が直線的に減少するが、その後は濃度差勾配の増加のため、蒸発しにくい成分が残って、図のごとく緩やかな曲線として減少するものと考えられる。

同図における定常蒸発初期には、直線部分の蒸発速度は $d\{(W_e/W_{f0})/A\}/dt=k_g$ (一定) となり、直線の勾配として求められる。 k_g はガソリンの定常蒸発初期における蒸発速度係数である。

定常蒸発初期以降、すなわち、直線部分以降の蒸発速度を (8) 式によつて求めるものとする、 k' を求めなければならない。よつて、(7) 式により、 $(W_e/W_{f0})/A$ と $\log t$ の図を描くと、Fig. 5 (B) のごとくなる。すなわち、一定炉温 θ_g では、油の初めの重量 W_{f0} に関せず、本実験の範囲において、直線

Fig. 5 (B) Inclines of the straight lines have no relation with the initial weights of oil

群の勾配が一定になる。これは、第 I 報に示した一定炉温 θ_g では、 W_{f0} に関せず定常油温が同一になるという結果と全く類似な関係といえる。この直線群の一定勾配がこの部分の蒸発速度係数 k' であり、Table 2 のごとく求められる。

Table 2 Evaporation velocity coefficients k' ($1/\text{cm}^2$) of Fuel oils

Fuel oils	Motor gasoline $\gamma_{15}^\circ=731\text{kg/m}^3$	Light diesel oil $\gamma_{15}^\circ=828\text{kg/m}^3$
$\theta_g(^\circ\text{C})$		
100	0.25	0.023
200	0.31	0.16
300	0.43	0.34
400	—	0.54

(b) ディーゼル軽油について

同様に、ディーゼル軽油 $W_{f0}=100\text{mg}\sim 400\text{mg}$ を、たとえば、 $\theta_g=300^\circ\text{C}$ の炉中に急に入れたとき、蒸発減量変化は Fig. 6 (A) となる。定常油温 θ_f は第

Fig. 6 (A) Evaporation of light diesel oil at the furnace temperature $\theta_g=300^\circ\text{C}$

I 報により、 $\theta_f/\theta_b=0.8$ (ここに、平均沸点 $\theta_b=266^\circ\text{C}$) から $\theta_f=212.8^\circ\text{C}$ となる。定常蒸発期間では、油温が一定になるが、蒸発面近くの油側の濃度差勾配が、ガソリンの場合のごとく一定にならず、たえず増加しつづけ、蒸発しにくい残留成分が残るため、図のごとく緩やかな減少曲線になるものと考えられる。

ここで、定常蒸発期間における蒸発速度係数を得ようとするが、純粋液体のごとく、一律に求めることができないので、つぎのように、二つの部分に分けて、別々に蒸発速度係数を求める。

定常蒸発初期の場合、Fig. 3 のごとく、ごく初期においては、 W_{f0} に関せずほぼ直線的に蒸発残留量

$W_{f0}-W_e$ が一定の勾配で減少する（すなわち、蒸発速度は近似的に一定とみなせる）が、より広い範囲について考えるために、蒸発速度式として (1) 式を用いる。(2) 式の線蒸発率 $2(\sqrt{1/A}-\sqrt{(1-W_e/W_{f0})/A})$ と t の図を画くと、Fig. 6 (A) における実線のように、相当の区間直線で表わされる。これらの直線の勾配がこの期間における蒸発速度係数 k である。 k は W_{f0} と θ_g によつてきまるから、(3) 式の実験式を導くと、つぎようになる。

$$k=7.24(W_{f0}^{-0.75}-0.00063) \\ (10^{-5}\theta_g^2-0.00271\theta_g+0.176) \quad (9)$$

この式から、軽油の場合、定常蒸発初期（例として、Fig. 6 (A) の直線部分）において、 θ_g と W_{f0} を与えると、 k を計算から求めることができる。ただし、 $\theta_g=100^\circ\text{C}\sim 400^\circ\text{C}$ 、 $W_{f0}=100\sim 400\text{mg}$ の範囲では(9) 式がよく適合するが、これらの範囲を少しはみ出したときは、近似的に利用できる。

定常蒸発初期以降、すなわち、Fig. 6 (A) の直線部分以降の場合は、(7)式によつて、 $(W_e/W_{f0})/A$ と $\log t$ の図を画くと、Fig. 6 (B) のようになる。こ

Fig. 6 (B) Inclines of the straight lines have no relation with the initial weights of oil

れは $\theta_g=300^\circ\text{C}$ の場合を示すが、他の炉温 θ_g の場合も同様に求められた。すなわち、一定炉温 θ_g では、 W_{f0} に関せず、直線群の勾配は一定になる。したがって、この関係はガソリンにおける場合と同様である。これらの直線群の一定勾配が、この部分における(7) 式を用いたときの蒸発速度係数 k' であり、Table

2 のごとくになる。

内燃機関の蒸発燃焼器などのごとく、油粒の集合体、あるいは、薄層をなした燃料油が高温面にさらされる場合など、蒸発速度あるいは蒸発時間を求めるような実際問題解決への一つの手掛りを得ることができる。

5. 結 論

容器に入れた燃料油を急に自然通気のできる一定高温の炉中に入れたとき、容器の影響を考慮して、定常蒸発期間において、つぎのことを明らかにした。

- (1) 純粋液体（水）では、蒸発速度は一定になる。
- (2) モーターガソリンでは、初めある区間蒸発速度は一定であるが、次第に小さくなる。
- (3) ディーゼル軽油では、ごく初めは蒸発速度はほぼ一定であるが、さらに広い区間を考えるために、定常蒸発初期について、線蒸発率を導き、蒸発速度係数 k の実験式を導いた。
- (4) ガソリンおよび軽油について、定常蒸発初期以降の場合、蒸発率は $(W_e/W_{f0})/A=k' \log t$ で表わされる。蒸発速度係数 k' は、同一炉温では、初めの油量に関せず一定になり、Table 2 のごとくになる。

終わりに、終始御懇篤なる御指導を賜わった東北大学工学部小林清志教授に深甚なる感謝の意を表わす。本報告は、昭和42年5月17日、日本機械学会秋田地方講演会にて講演したものである。

文 献

- 1) N. Frössling, *Gerlands Beiträge zur Gesphysik*, 52, 170 (1938)
- 1) 小林清志, 日本機械学会論文集, 内燃機関特集号, 15, 52, 14 (昭24)
- 3) R. D. Ingebo, *Chem. Eng. Progress*, 48, 8, 403 (1952)
- 4) 西脇, 荻, 木下, 日本機械学会, 第28期定期総会講演会 (昭26-4)
- 5) 千葉近, 燃協誌, 47, 494, (昭43)
- 6) J. Stefan, *Ann. d. Phys. (Wied.)*, 17, 550 (1882)
- 7) Mc Adams, Addoms et al., *Chem. Eng. Progy.*, 44, 639 (1948)
- 8) H. Kornbicher, N. Kreitzinger, *A. E. G. Mitteilungen*, 48-1, 30 (1958)

Study on the Evaporation of Fuel Oil (II)

—Evaporation Velocity of Motor Gasoline and Light Diesel Oil—

by Chikashi Chiba

(Technical Junior College, Yamagata Univ.)

SYNOPSIS : The author has elucidated the following relations at steady state from the experiments, in which fuel oil contained in crucible was rapidly put into a constant temperature furnace of natural draught.

- (1) The evaporation v of a pure liquid (water) is constant.
 - (2) v of a motor gasoline is constant at the initial term, then becomes smaller gradually.
 - (3) The author derived the rate of linear evaporation for a light diesel oil and obtained the empirical equation of evaporation velocity coefficient k at the initial term.
 - (4) As for the motor gasoline and the light diesel oil, the rate of evaporation per unit area is proportional to the logarithm of time of evaporation after the initial term of stationary state. The proportional constant k' is the coefficient of evaporation velocity. k' is constant with the same furnace temperature without regard to the initial weights of oil.
-