

## 高温壁面上における液滴燃料の蒸発寿命時間

嶽間沢秀孝\*, 児島忠倫\*

### Evaporation Lifetime of Fuel Droplet on Hot Surface

Hidetaka GAKUMASAWA and Tadatomo KOJIMA

#### Synopsis

It is important to clarify evaporation characteristic of liquid fuel such as gasoline and diesel fuel. This study was conducted on evaporation phenomena of a fuel droplet on a hot wall. Several kinds of liquid normal-paraffin such as *n*-pentane, *n*-hexane, *n*-heptane, *n*-octane, *n*-nonane and *n*-decane and constitutional isomers were used as the test. The influence molecular structure of fuel affect evaporation lifetime was investigated in detail.

*Key Words* : Evaporation, Hot Wall, Liquid Fuel, Evaporation Lifetime, Constitutional Isomers

#### 1. はじめに

筒内噴射ガソリンエンジン車は、市場に量産型が登場してから約 10 年が経過し、急速にシェアを広げている。燃料油を直接燃焼室内に噴射するのは、直噴ディーゼル機関と同じで、ガソリン機関の方が小型の場合が多く、未蒸発の液体燃料がピストンやシリンダ側壁に到達し、高温壁面上に衝突して蒸発していることが予見され、潤滑にも問題を及ぼしていると考えられる。

高温壁面に燃料油が衝突し蒸発する現象は、多く見られる。これまで、ガソリンより蒸発が遅い軽油を使用するディーゼル機関対象とした研究がなされてきた。これらの壁面蒸発はジェットエンジンの燃焼室および重油の燃焼器にもみられる。

高温壁面での液滴の蒸発現象は、田村・棚沢<sup>1)</sup>によって初めて解明され、壁面温度により非常に特異な現象となることが示された。この実験は大気圧下で行われなれたものだが、有意な資料を提供し、後続の多くの研究の規範となっている。廣安らは<sup>2)</sup>広範囲に雰囲気温度、圧力を変化させて、

単一液滴の壁面蒸発について詳細に実験を行っている。さらに、雰囲気温度・圧力が燃料の臨界温度・圧力を越えた場合についても実験<sup>3,5)</sup>が行われている。しかし、これまでの研究の多くは、蒸発の遅い軽油を対象としたものである。直噴ガソリン機関は雰囲気がディーゼル機関に比べ低圧であり、燃料のガソリンの蒸発が早い現象であるが、その詳細は未だに明らかになっていない。これらの蒸発特性が、直噴ガソリン機関の燃焼特性を支配することは容易に予測できる。

著者らも、ガソリン中に含まれると考えられる炭素数の直鎖炭化水素について、壁面蒸発現象の観察を行い、蒸発寿命時間の測定<sup>6)</sup>と、燃料の蒸発過程の観察を行ってきた。本研究では、測定精度の向上を図った詳細な観察を行い、直鎖炭化水素燃料の炭素数を変化した場合の寿命曲線の及ぼす影響を詳細に調べた。さらに、ヘキサン、ヘプタン、オクタンの構造異性体を使用して、炭化水素燃料の骨格構造が変化した場合についても燃料の壁面蒸発現象を観察した。

\*近畿大学工学部システムデザイン工学科

Department of System Design Engineering  
School of Engineering, Kinki University

## 2. 実験装置および方法

### 2. 1 実験装置と寿命時間測定法

図1に実験装置の概略を示す。高温壁面は下部に設置した1300Wの電気ヒーターで加熱した。印加電圧は変圧器で調整し、実験中の壁面温度を一定に保持した。壁面温度は、60℃から発火点以下の300℃まで20℃刻みに変化させた。燃料は、加熱壁面上30mmに垂直に固定された燃料供給装置から、壁面中央に向けて滴下した。壁面は直径100mm、厚さ30mmの鋼製である。燃料の壁面蒸発中にライデンフロスト現象が生じ、燃料が壁面外部に飛び出すのを防ぐ目的で、上部をR168mmに凹加工した。また、壁面表面の表面粗さは、壁面蒸発現象に大きく影響をおよぼす支配因子の一つであるため、2000番のやすりで磨いて使用した。

燃料供給装置には、ニチリョウ製デジタルマイクロピペット(NPX-100)を採用した。本研究では、燃料の滴下は10 $\mu$ lの単一液滴(真球直径2.67mm)として行った。燃料の壁面蒸発挙動は、現象が遅い場合は直接目視観察し、現象が早い場合には、デジタルビデオカメラ(SONY DVCR-VX2000)を用いて撮影し、観察した。壁面蒸発の寿命時間の測定には、ストップウォッチとビデオの再生コマ数(30コマ/秒)を用いた。なお、寿命時間の定義は、燃料液滴が高温壁面に到達してから燃料液滴が消えるまでの時間とした。

### 2. 2 供試燃料

本実験では、ガソリンの主成分である飽和炭化水素燃料を使用した。常温・常圧下で液体となるはじめる炭素数5のn-ペンタン(C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>)から、炭素数10のn-デカン(C<sub>10</sub>H<sub>22</sub>)を用い、物性値をはば広く変化させて、これらの直鎖炭化水素燃料の壁面蒸発現象を詳細に観察した。さらに、ヘキサン、ヘプタン、オクタンの構造異性体を使用して、壁面蒸発現象に及ぼす分子構造の影響を調べた。

## 3. 結果と考察

### 3. 1 単一液滴の壁面蒸発

本研究では、12種類の飽和炭化水素燃料の壁面蒸発を行ったが、すべての燃料とも壁面温度と寿命時間の関係は、核沸騰領域、遷移沸騰領域、膜沸騰領域を持つ沸騰曲線を反転した形状になる。図2に炭素数7のn-ヘプタンを滴下させた場合の、壁面温度Tと寿命時間tの関係を示す。また、図3に高温壁面上での液滴の蒸発状態を示す。

図2の点A~Bの低温領域(核沸騰領域領域)では、高温壁面に到達した液滴は、壁面上で図3

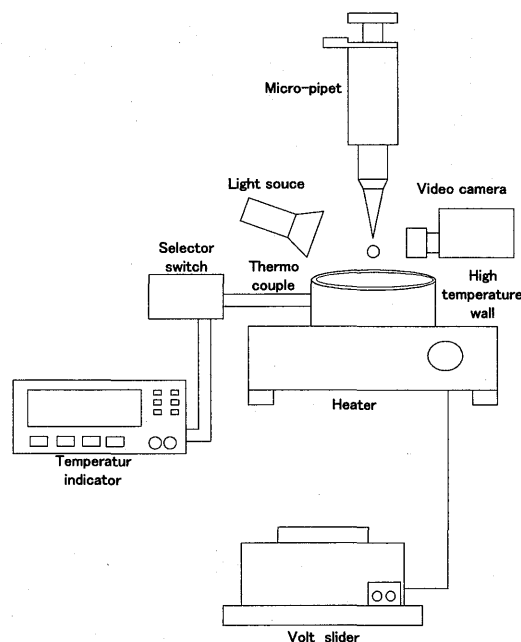


図1 実験装置の概略

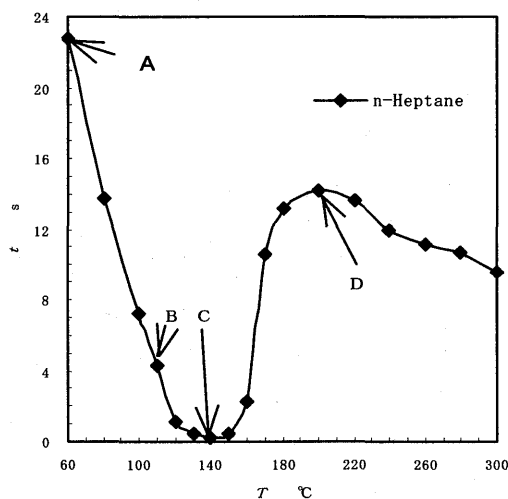


図2 n-ヘプタンの寿命時間,

(a)のように、凸レンズ状の液体膜を形成して広がる。その後、この形状のまま蒸発し小さくなり、やがて消滅する。この領域で、壁面温度を上昇すると寿命時間は次第に短くなる。この曲線の傾きには、壁面表面(伝熱面)の状態が大きくかかわっている。本実験では、伝熱面を2000番の耐水ペーパーで研磨したが、伝熱面の仕上げが粗くなると発泡しやすい面となるため、A~B直線の傾きが緩やかになる傾向が見られた。このときの凸

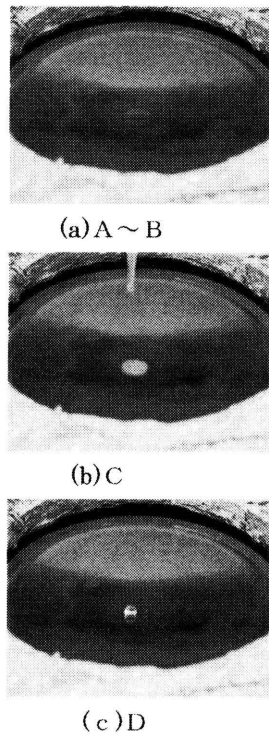


図3 高温壁面上における燃料液滴の状態 (A~Dは図2に対応)

レンズ状の液体膜では、ある程度の厚みがあり、伝熱が表面からの熱伝導層と内部の飽和温度以下の対流部分で構成されると考えられる。B点よりさらに高温にすると、凸レンズ状の燃膜の厚さが薄くなり、対流部分を維持できなくなり寿命時間が短くなる。

さらに壁温を 100℃以上を上昇させると、凸レンズ状の燃膜の中央部付近から蒸気泡が発生しはじめ、寿命時間が急激に短くなる。

点Cは、最大蒸発率点 (T=140℃) で、壁面に到達した液滴が図3 (b)のように瞬間的に壁面上に広がりすぐに消滅する。これは沸騰の極大値に相当する温度の伝熱面上では、液滴の寿命時間はゼロに近い高速現象であることを示している。

T=180℃の点Dは、ライデンフロスト点で図4 (c)のように、壁面到達後の液滴が壁面上に単一球となって、壁面上に安定して浮かび上がり、そのまま蒸発を続けて、ある大きさまで小さくなると、壁面に落下してすぐに消滅する。このため壁面温度を最大蒸発率点 (C点) からわずかに上昇すると、寿命時間が急に長くなる。壁面温度をライデンフロスト点以上を上昇させると、球状に浮かんでいる燃料液滴が小躍りしながら小さくなり、寿命時間は短くなる。

### 3. 2 直鎖飽和炭化水素燃料の寿命時間

直鎖飽和炭化水素燃料の炭素数を5から10まで6種類変えた場合の、寿命時間を図4に示す。また、表1にこれら使用燃料の物性値を示す。なお、n-ペンタンは、沸点が36.1℃と実験室の室温に近いので、燃料を供給装置に吸入して滴下するまでの間に蒸発が進行し、測定値に若干のばらつきが生じた。

寿命曲線は、炭素数を増やすと高温側にずれていくほぼ相似形のものとなった。低温領域の寿命時間は炭素数の小さい、沸点の低い燃料ほど短く、

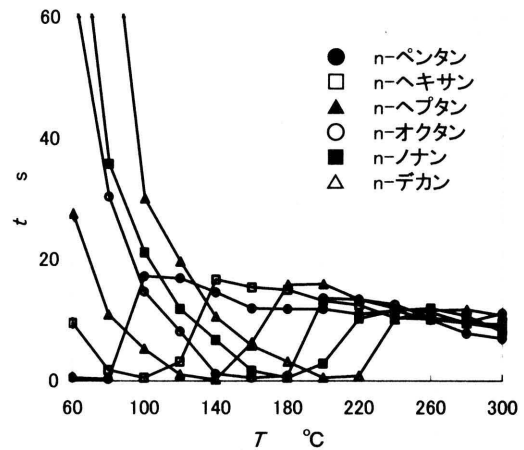


図4 直鎖飽和炭化水素燃料の寿命時間

表1 使用燃料の物性値

	沸点 ℃	密度 kg/m <sup>3</sup>	比熱 kJ/(Kg·K)	粘性係数 μPa·s	熱伝導率 mW/(m·K)	表面張力 mN/m
n-ペンタン C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	36.1	621	2.319	225	119	15.48
n-ヘキサン C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	68.7	655	2.269	299	123	18.40
n-ヘプタン C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	98.4	680	2.246	397	127	20.80
n-オクタン C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	125.7	699	2.226	515	130	21.80
n-ノナン C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	151.6	721	—	—	—	—
n-デカン C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	173.9	730	—	—	—	—

現象が沸点に支配される。また、最大蒸発率点の壁面温度は、炭素数の大きい蒸発しにくい燃料ほど高温になる。

すべての燃料で、ライデンフロスト現象が観察された。壁面から浮上する燃料球は、壁面中央に安定して浮上しながら蒸発し、ある大きさまで小さくなると、落下しすぐに消滅する。各燃料のライデンフロスト点での寿命時間は、炭素数の小さい燃料ほど長くなっているが、測定値がばらついた。これは形成される単一球の大きさに寿命時間が変化するが、燃料の壁面接触、単一球の浮遊が一瞬に行われる複雑な現象で、生成浮遊する単一球の大きさに差がでたり、主球と従球が現れたりするためである。

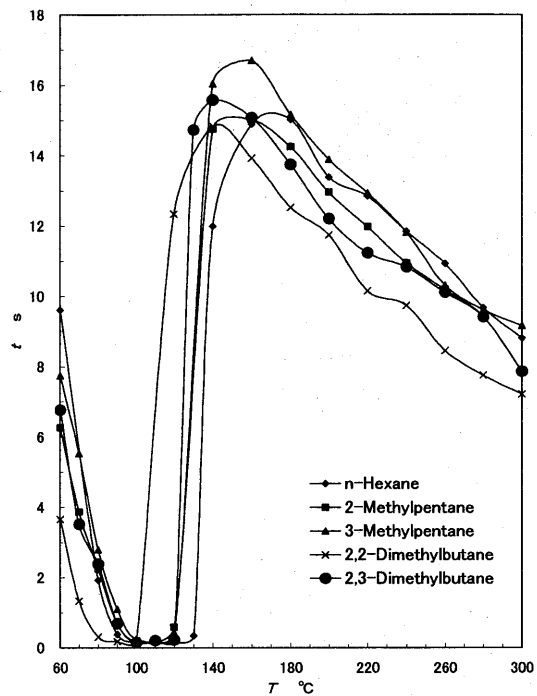
ライデンフロスト点以上の高温領域では、燃料の種類を変えても、寿命時間はほぼ同じ長さになった。この領域では、燃料はいずれも単一球になって壁面上に浮上したまま蒸発しているため、寿命時間は壁面衝突直後にできる浮上燃料球の量や、浮遊高さの影響を受けると考えられる。

3. 3 寿命時間におよぼす燃料の分子構造の影響 (炭素数6のヘキサンの場合)

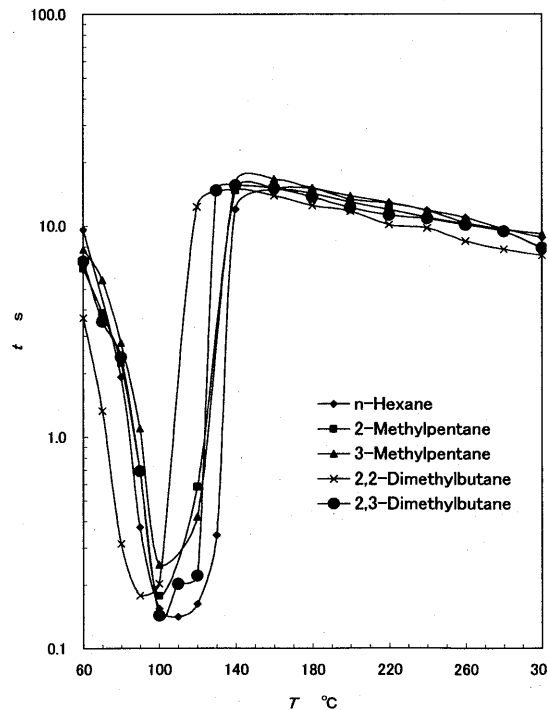
炭素数6のヘキサンには、分子構造の異なる5つの構造異性体が存在する。この5種類の燃料を用いて、分子構造が寿命時間に影響するかを調べた結果を図5に示す。図5(a)では、最大蒸発率点付近の値が見にくくなるため、時間軸を対数にしたものを(b)に示す。また、これらの燃料の沸点を表2に示す。炭素数が同じ燃料のため、寿命曲線に大きな差異は見られなかった。n-ヘキサンは、他の4つの異性体に比較して、最大蒸発率点、ライデンフロスト点が最も高温になっている。これは、n-ヘキサンの沸点が他の異性体より高いためと考えられる。同様に、最大蒸発率点の温度は沸点の低い燃料ほど低くなる。2,2-ジメチルブタンは、沸点が49℃と他の異性体より10~20℃程度と極端に低くなっている。そのため、2,2-ジメチルブタンの寿命曲線は他の曲線より左にずれて壁面蒸発が早いことがわかる。直鎖構造の炭化水素の沸点が異性体より高く壁面蒸発しにくいと考えられる。

表2 ヘキサンの異性体の沸点

	沸点 °C
n-ヘキサン (C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> )	68.7
2-メチルペンタン	62
3-メチルペンタン	64
2,2-ジメチルブタン	49
2,3-ジメチルブタン	58



(a)



(b)

図5 炭素数6の飽和炭化水素燃料の寿命時間

3. 4 寿命時間におよぼす燃料の分子構造の影響 (炭素数7のヘプタンの場合)

炭素数7のヘプタンには9つの構造異性体があるが、n-ヘプタン、2-メチルヘキサン、3-メチルヘキサン、2,2-ジメチルペンタンの4つについて同様に寿命時間を調べた。寿命時間の測定結果を図6に、使用した燃料の沸点を表3に示す。前節と同様に分子構造が直鎖のn-ヘプタンの最大蒸発率点、最も高温となった。これは、沸点が高温であるため、壁面蒸発が遅れるためである。2-メチルヘキサンと3-メチルヘキサンを比較すると、最大蒸発率点の温度はほぼ同じ値となるが、その時の寿命時間は2-メチルヘキサンの方が短くなっている。この2つの燃料の沸点の差は2℃と小さいが、沸点の低い2-メチルヘキサンの壁面蒸発が速くなると考えられる。一つの炭素に2つのメチル基が結合している2,2-ジメチルペンタンの場合は、他の燃料より沸点が10℃以上も低い。そのため、最大蒸発率点、ライデンフロスト点とも最も低い温度となり、寿命曲線は左にずれて現れている。

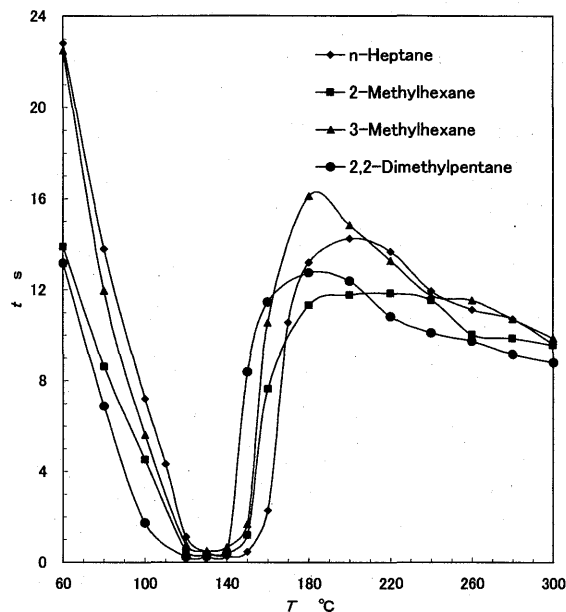
3. 5 寿命時間におよぼす燃料の分子構造の影響 (炭素数8のヘプタンの場合)

炭素数8のオクタンには18個の構造異性体が存在する。n-オクタン、2-メチルプタン、3-メチルプタン、4-メチルプタンについて同様に寿命時間の測定を行った。これらの燃料の沸点を表4に寿命時間の測定結果を図7に示す。

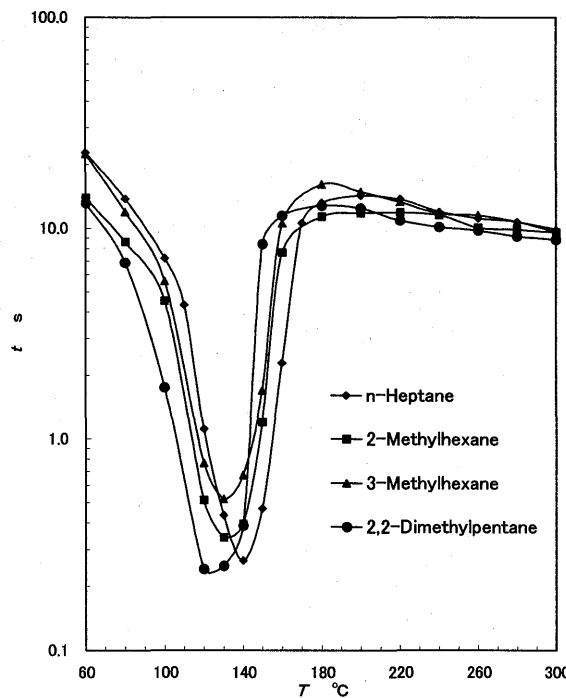
これらの燃料の沸点の差は約14℃しかないため寿命曲線に大きな差異は現れない。沸点が最大のn-オクタンの最大蒸発率点が高くなるのが予測されるが、本実験の精度ではそれを裏付ける結果が得られなかった。2-メチルプタン、3-メチルプタン、4-メチルプタンの最大蒸発率点は、この順番に高くなっていく。メチル基が直鎖部分の端に近いところで結合する異性体が、沸点が低く壁面蒸発の速い良好な燃料であると考えられる。

表3 ヘプタンの異性体の沸点

	沸点 °C
n-ヘプタン (C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> )	98.4
2-メチルヘキサン	90
3-メチルヘキサン	92
2,2-ジメチルペンタン	79



(a)



(b)

図6 炭素数7の飽和炭化水素燃料の寿命時間

表4 オクタンの異性体の沸点

	沸点 °C
n-オクタン (C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> )	125.7
2-メチルヘプタン	112
3-メチルヘプタン	119
4-メチルヘプタン	118

## 4. 結 言

(1) 直鎖飽和炭化水素燃料の液滴の寿命曲線はほぼ相似形のものとなり、ライデンフロスト点より高温の寿命時間がほぼ等しくなる。

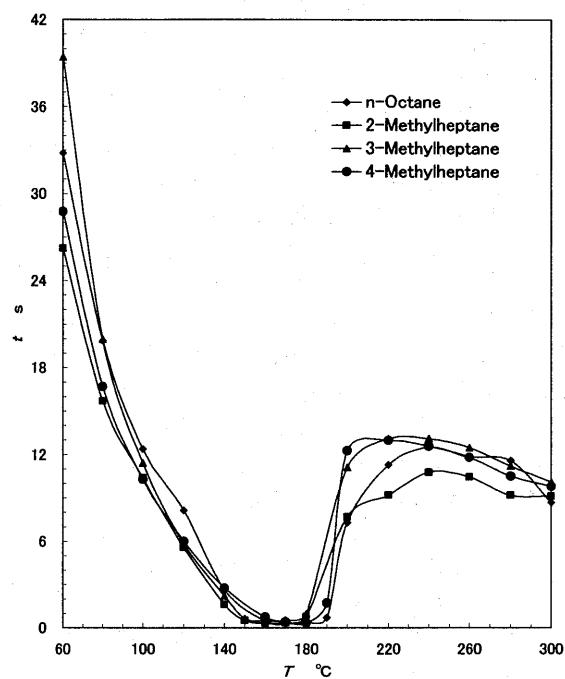
(2) 炭素数の同じ異性体の中で、直鎖構造の飽和炭化水素燃料が最大蒸発率点、ライデンフロスト点とも最も高温となる。

(3) メチル基が直鎖の端に近いところで結合する異性体が、沸点が低く寿命時間が短くなる。

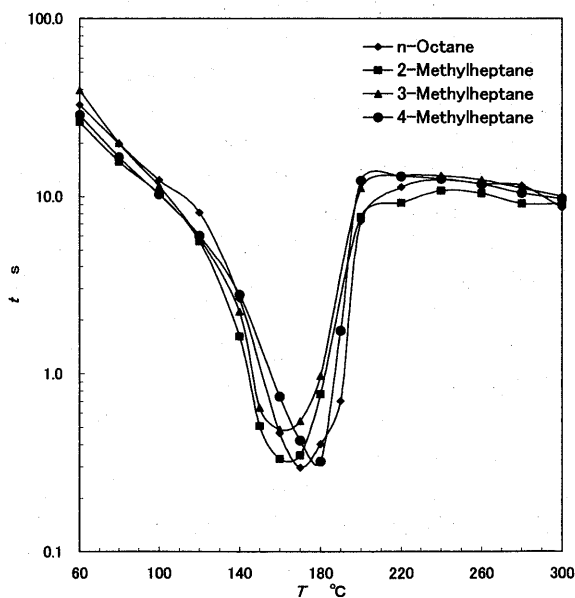
(4) 最大蒸発率点では、壁面に到達した液滴は瞬間的に蒸発し消滅するため、寿命時間は限りなくゼロに近くなる。

## 参 考 文 献

- (1) 田村・棚沢, Seventh Symp. on Combustion (1959), p.507.
- (2) 廣安・他 2 名, 機論, 39, (1973), pp.3779-3787.
- (3) Adadevoh, J.K., 他 2 名, SAE Paper, No.701B, (1963).
- (4) 西田・他 2 名, 機論, 59, B(1993), pp.2550-2554.
- (5) 西田・他 2 名, 機論, 59, B(1993), pp.2555-2559.
- (6) 嶽間沢・他 2 名, 近畿大学工学部研究報告, 36, (2002), pp.179-184.



(a)



(b)

図7 炭素数8の飽和炭化水素燃料の寿命時間