水面に浮遊した燃料の液面燃焼*

(第1報, 水の沸騰による燃焼率の変化)

新井 雅隆^{*1}, 斎藤 孝三^{*2}
R. A. Altenkrich^{*3}, D. D. Evans^{*4}Pool Combustion of Liquid Fuels on a Water Sublayer
(1st Report, Burning Rate affected by Water Boiling)Masataka ARAI, Kozo SAITO,
Robert A. ALTENKRICH, and David D. EVANCE

Under certain circumstances, the water on which a burning pool of liquid fuel is supported may begin to boil. The bubble of water vapor that is released and escapes through the fuel surface tends to change the temperature distribution in the fuel layer and sometimes to atomize the fuel which results in a boilover of the burning liquid fuel. A pool fire system, in which the burning surface of the fuel was fed into the flame so that a boiling water sublayer could be observed, was designed to investigate the effect of water sublayer on the burning phenomena of the liquid fuel layer. Data obtained include temperature and mass loss history of the liquid fuel and water, flame height, and irradiance from the flame. Results show that when boiling occurs, the temperature gradient across the fuel layer vanishes, the temperature level of the fuel decreases, and the burning rate of the fuel decreases. Because water-vapor bubbles released from the fuel-water interface stir the fuel layer as they pass upward through it.

Key Words: Liquid Fuel, Flame, Burning velocity, Boiling, Pool Fire

1. ま え が き

液面燃焼に関しては, 石油タンク火災や海面上に流出した燃料による火災など, 主として災害防止の観点から研究⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾が始められ今日に至っている。ところが水面上に流出した燃料の液面燃焼に問題を限ってみると, これをモデル化した一次元の解析⁽⁸⁾⁽⁹⁾も行われているが, 燃焼の進行とともに下部の水層の温度が上昇し沸騰を開始する場合もあり, これに関しては現象の解析すら現在のところ詳しくは行われていない。そこで水面に浮遊した燃料の液面燃焼について小規模の実験を行い, 燃焼率や燃料および下部の水層内の温度分布の変化などを測定し, 現象の解明に努めたので, その結果を報告する。

2. 実験装置および方法

実験装置を図1に示す。燃焼容器内に水を深さ H_w

まで満たし, その上に燃料を浮かべその厚さを H_f とする。この燃焼系に対して容器の側方から数本の熱電対を差し込み, 燃料層と下部水層の温度変化を測定する。火炎の状態はビデオカメラで録画し, これから各種の計測を行う。容器支持台を含めた燃焼系はロードセルの上に載せてあり, 質量変化はペンレコーダで記録する。

使用した燃料は表1に示した純粋燃料12種類, 3種類の原油, ガソリン, 灯油, 軽油, である。表1中にはそれぞれの燃料の沸点 T_{bp} , 密度 ρ , 比熱 C_p , 熱伝導

図1 実験装置

* 平成元年6月2日 第26回日本伝熱シンポジウムにおいて講演, 原稿受付 平成元年8月21日。

^{*1} 群馬大学工学部 (〒376 桐生市天神町1-5-1)。

^{*2} Univ. of Kentucky, Lexington, KY 40506, USA.

^{*3} Mississippi State Univ., PO Box A, Mississippi State, MS 39762, USA.

^{*4} National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899, USA.

率 λ , 蒸発潜熱 Q_L , 発熱量 Q_{com} とあとで述べる燃焼割合 M_b/M_{fi} が示してある。

容器の側面は内径48 mmのステンレス製円筒, 底面はパイレックスガラスであり, 底面を通して火災や下部水層の沸騰の状態を観察する。容器の深さは72 mmのAタイプと12 mmのBタイプの2種類とし, Bタイプは燃料の下部に水層のない比較実験の場合に用いた。容器に水と燃料を満たした状態は図2に示したとおりである。

燃焼により液面が降下すると一般には燃焼状態が変化する。図2(a)に示した装置をオーバーフロータンクにつなぎ液面の位置を制御してこの影響を調べた結果, 液面から容器の縁までの高さが15 mm以内なら全燃焼期間に現れる液面降下の影響が無視できることは, 予備実験の結果明らかになっている。そこで燃焼中の質量変化を測定する都合上液面の制御は行わず, 以下に行う研究においては, 初期温度 T_i が293 Kで初期の燃料厚さ H_{fi} を10 mm, 初期の燃料表面から容器の縁までの高さ H_r を2 mmとした場合を標準条件として燃焼実験を行った。

3. 燃焼状態と液相内の温度分布

水面に浮遊した液体燃料の燃焼状態の一般的な推移を図3にスケッチとして示す。まず拡散火災が形成され〔図3(a)〕, しばらくすると, 燃料と水の界面で容器に接している部分から気泡の発生が開始し, 気泡の発生は界面全体から連続的に行われるようになる〔図3(b)〕, 気泡の発生は時として活発になり〔図3(c)〕に示すように界面の大部分が大きな気泡塊に覆われ, それが燃料の爆発的な飛散をもたらしこともある。これは重質油のタンク火災でボイルオーバとして指摘されている現象である。燃焼の最後の段階では容器の縁

に沿ったリング状の火災が形成される〔図3(d)〕, 燃焼末期には容器の中央部分から燃料層が消失していくが, 沸点の高い純粋燃料や重質油の場合では燃料の層が残ったままで消炎する〔図3(e)〕。一般に気泡の発生がスムーズに行われる場合にはボイルオーバは起きにくく, ボイルオーバが発生するとその直後に消炎する場合が多い。

図4にヘプタンの場合の各層の温度の時間的変化を示す。ヘプタンの沸点は371.6 Kで水の沸点より低い

図2 燃焼容器

図3 燃焼状態のスケッチ

表1 燃料の物性値と燃焼割合

Symbols	Fuels	T_{bp} (K)	ρ (kg/m ³)	C_p (kJ/kgK)	λ (W/mK)	Q_L (kJ/kg)	Q_{com} (kJ/kg)	M_b/M_{fi}
○	n-Pentane	309.2	631	2.33	0.118	358	45300	+100%
□	n-Hexane	341.9	664	2.31	0.137	335	45050	+100%
△	n-Heptane	371.6	688	2.17	0.127	316	44880	+100%
▷	2,2,4-Trimethyl Pentane	372.4	696	—	—	272	44590	+100%
◁	n-Octane	398.2	707	2.42	0.143	300	44720	+100%
▽	n-Decane	443.2	745	2.46	0.138	276	44550	95%
◇	Hexadecane	559.2	777	—	—	228	44250	>5%
●	Benzene	353.3	885	1.75	0.144	393	40530	+100%
⊗	Toluene	383.2	872	1.84	0.151	362	40700	+100%
▲	Ethyl Benzene	409.2	872	1.70	—	339	41280	+100%
○	Gasoline (unleaded)	—	772	2.01	—	—	43960	+100%
□	Kerosene (K-1)	—	796	1.93	—	—	43050	78%
△	Diesel Fuel (No.2)	—	846	1.80	—	—	41870	34%
●	Murban Crude Oil	—	824	—	0.120	—	—	31%
■	La Rosa C.O.	—	911	—	0.132	—	—	25%
▲	Alberta Sweet C.O.	—	839	—	0.121	—	—	45%

図4 液層内の温度変化 (ヘプタン)

ため燃焼中に気泡は発生しない。温度の測定位置は、燃料と水の界面を $Z=0$ mm の基準位置とし、界面上方をプラス下方をマイナスで表現している。着火後熱電対の指示温度はなだらかに増加し、燃焼に伴い燃料液面が降下するため測定位置が液面付近に近付くと燃料の沸点に近い温度を示すようになる。その後、測温部が液面から分離し気相に出ると温度は急激に増加する。また下部の水層の温度は水自身の沸点に達することなく、燃焼の最後の段階で燃料の沸点にまで上昇する。

沸点 409.2 K のエチルベンゼンについての温度の測定結果を図5に示す。水層の温度が上昇して水の沸点に達するまでは図4の場合と大差がなく、燃料層と下部の水層とも層状の温度分布となる。また燃料の上面に近い測定位置では温度が燃料の沸点に近付く。しかるに、 $Z=-1$ mm の位置の温度変化から明らかなように界面直下の水層が水の沸点に達すると、その温度はもはや上昇せず、そこから気泡を発生する。発生した気泡は上部の燃料層を通過し燃料表面で燃料を飛散させながら液面から離脱する。燃料層を通過する気泡は高温の燃料層から熱を吸収しさらに燃料層をかく拌するため、燃料層の温度は均一化し、かつ低下する。火炎から燃料層に伝わった熱の一部分は水の蒸発で消費されるため、気泡の発生開始後均一になった燃料層の温度はさらに低下し、燃焼末期には水の沸点よりわずかに高い温度に落ち着く。

4. 高沸点燃料の場合の温度変化と燃焼割合

図6に表1に示した各種の燃料について界面上3 mm の所の温度の変化を示す。ペンタン、ヘキサン、ヘプタンについては温度がそれぞれの沸点に近付いた後若干減少し燃焼の終了に至っている。オクタンとデ

カンについては燃料層の温度が燃料の沸点に近付くことはなく、オクタンについては燃焼は燃料が消費し尽くされた後に終了する。しかし、デカンでは燃焼後期において気泡の発生が盛んになり、これが熱を奪うため燃料の蒸発が抑制され、燃焼が維持できなくなり5%ほどの燃料を残して消炎してしまう。

沸点の高いヘキサデカンの場合にはこの傾向はさらに顕著にあらわれ、界面上3 mm の所の温度が約390 K に達すると界面から気泡が発生する。その後は、気泡による燃料層のかく拌に伴い燃料表面の温度が低下し消炎が発生してしまう。この現象が発生するまでに燃焼するヘキサデカンは全体の5%未満である。いいかえれば、ヘキサデカンのような高沸点の燃料は水面に浮遊させた状態では燃焼を維持させることができないことをこの結果は示している。

アルベルタ・スウィートなどの原油については種々の沸点の物質を含む複合燃料であるため、温度変化はデカンとヘキサデカンの中間的な状態を示す。また燃焼後期でのボイルオーバは実験した範囲では軽油でいちばん激しく発生する。原油では燃焼そのものが激しくないため、また低沸点の燃料では大きな温度差が燃料層の中にできにくいためボイルオーバは顕著でなくなる。標準条件で燃焼させた場合に、消炎が発生するまでに燃焼した量の初期燃料量に対する燃焼割合 M_b/M_i を他の燃料についても求め、結果を表1に併記しておく。

未燃燃料の割合、すなわち燃焼後に残存する燃料量を3種類の原油について、Evans⁽¹⁰⁾が直径1.2 m の容器内の水面に初期厚さの異なる原油を浮遊させて測定した値と、Aタイプの容器を用いた本実験の値を図7に示す。本実験では容器の径が小さいため燃焼末期における容器壁への熱損失が大きいことや火炎からの伝熱量が少ないため、容器径の大きな場合に比べると

図5 液層内の温度変化 (エチルベンゼン)

図6 種々の燃料についての燃料層内の温度変化

消炎が早く発生し、その結果燃焼後に残存する燃料量も多くなっていることがこの比較により明らかになった。しかし、容器径が大きい場合でも初期の燃料厚さが数 mm になると残存する燃料量は急激に増加し、水面に浮遊した状態の原油を燃焼により処理することはできなくなる。

5. 燃 焼 率

燃焼した燃料の質量と燃焼に要した時間から平均の燃焼率 $\bar{M}_f$ を求めた。この値は燃料の種類や燃料と燃料下部の水の温度によって変化する。図8は両者の初期温度を同時に変化させた場合の燃焼率の測定結果であり沸点の低いトルエン (沸点 T_{bp} は 383.2 K) のほうが沸点の高いエチルベンゼン ($T_{bp}=409.2$ K) やデカン ($T_{bp}=443.2$ K) に比べて初期温度の影響を受けやすい。これは沸点が水よりわずかに 10 K しか高くないトルエンの場合では初期温度の増加とともに、燃料表面と界面の間の温度こう配が小さくなり、下部の水層に伝えられていた熱量が減少するため火炎から燃料に伝えられた熱のうち燃料の蒸発に費やされる割合が増し燃焼率が増加したとみられる。一方デカンの場合では前述した効果と下部の水層からの気泡発生による熱の吸収とかく拌の効果の両者が初期温度の増加とともに活発になり、両者の影響が打ち消し合い、結果的に燃焼率が変化しなかったものと考えられる。

熱は火炎から液体燃料表面に対流とふく射によって伝えられるが、燃料の物性により火炎からのふく射熱は大きく異なる。図9はパラフィン系とアロマトミック系の炭化水素燃料について標準条件での平均の燃焼率を測定し、燃料の沸点を横軸にとって表したものである。両系列の燃料ともそれぞれの曲線上にのり、アロマトミック系の燃料は沸点の等しいパラフィン系の

燃料の約 1.5 倍の燃焼率で燃焼することが判明した。両系列の燃料の発熱量に大差がないことから、この理由としては液面上に形成された拡散火炎内のすすの生成がアロマトミック系の燃料の場合に多く、すすからのふく射で液面に伝えられる熱量に両者の差があったものと考えられる。また燃料の沸点の上昇とともに燃料表面と界面の温度差は大きくなり、このため水層への伝熱量が増加し、その結果燃料の沸点とともに燃焼率は低下する。

図10にエチルベンゼンを燃料とした場合の火炎高さ、火炎からのふく射量、燃焼による質量の減少の測定例を示す。実線は標準条件での結果、破線はBタイプの燃焼容器に初期厚さ 10 mm の燃料を満たして燃焼させた結果で、質量の基準は容器に燃料を満たさない状態を原点として表現してある。Bタイプの容器での燃焼実験では、最初、燃焼率 $13.1 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ の一定の割合で燃焼が進行する。着火後約 3 min たつと燃料の減少割合がそれ以前の約 2.6 倍に増加し、火炎高さとふく射量も増加する。Aタイプの標準条件で燃焼させた場合は、最初の約 6 min はBタイプの容器の場合

図8 平均の燃焼率と初期温度の関係

図7 残存する原油と初期燃料厚さの関係

図9 種々の燃料の平均の燃焼率

図 10 火炎高さ、ふく射量および燃焼率の変化
(エチルベンゼン)

と同じく燃焼率 $13.1 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ の一定の割合で燃焼が進行する。着火後 6 min を経過すると下部の水層からの気泡の発生が開始され、それに伴って質量の減少割合は若干低下し $12.5 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ となる。また火炎高さやふく射量も徐々に低下してゆく。燃焼の終了時の質量は燃料を満たす前の初期状態より少なく図ではマイナスの質量で表現されている。これは気泡の発生以後に燃料とともに下部の水層から水が蒸発したためであり、これを補正して気泡発生後の燃料の実質的な燃焼率を求めると $10.4 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ となる。つまり気泡の発生により燃焼率は約 0.8 倍に低下していることがこの結果明らかになった。

6. ま と め

水面に浮遊した燃料の液面燃焼について問題を単純化し、容器内で水面に浮遊した燃料層の液面燃焼実験を行い、現象の解明を行った結果、次の事項が明らかになった。

(1) 燃料の沸点が水の沸点より低い場合は燃料下部の水層は単なる熱の吸収体としてしか作用しないが、沸点が水より高い場合は燃料と水の界面から気泡が発生し、高い沸点の燃料ではボイルオーバが発生して燃焼が中断する場合がある。

(2) 界面から気泡が発生すると気泡発生に伴う蒸発潜熱の吸収や気泡による燃料層のかく拌効果のため、燃料層の温度は均一かつ低下する。またそれに伴い燃焼率は低下する。

文 献

- (1) Hall, H. H., *Mech. Engrg.* **47-7**(1925), 540-544.
- (2) Blinov, V. P. and Khudyakov, G. N., *ASTIA*, T-1490, AD 296762, (1961), 56-163.
- (3) Seeger, P. G. (Black shear, P. L., ed.), *Heat Transfer in Fires: Thermodynamics, Social Aspects, Economic Impact*, (1974), 95-126, Scripta Book Company.
- (4) Yumoto, T., Takahashi, A. and Handa, T., *Combust. Flame*, **30**(1977), 33-43.
- (5) Ndubizu, C. C., Ramaker, D. E., Tatem, P. A. and Williams, F. W., *Combust. Sci. Technol.*, **31**(1983), 233-247.
- (6) Mudan, K. S., *Prog. Energy. Combust. Sci.*, **10**(1984), 39-80.
- (7) Emori, R. I. and Saito, K., *Combust. Sci. Technol.* **31**(1983), 217-231.
- (8) Twardus, E. M. and Brzustowski, T. A., *Archiv. Combust.*, **1**, 1/2(1981), 49-60.
- (9) Brzustowski, T. A. and Twardus, E. M., *Proc. 19th Int. Symp. Combust.*, (1982), 847-854.
- (10) Evans, D., Mulholland, G., Gross, D., Baum, H. and Saito, K., *Environmental Effect of Oil Spill Combustion, Proc. 10th Arctic Marine Oil Spill Program Tech. Seminar*, (1987), 1-40.