

炭酸ガスレーザーによる燃料および水液滴の放射加熱蒸発

日大生産工（院） 瀧川 仁志 日大生産工 野村 浩司
日大生産工 山崎 博司 日大生産工 氏家 康成

1. 緒言

噴霧燃焼はディーゼル機関や、ガスタービン、ロケットエンジン、工業炉などの燃焼器に用いられている燃焼方式である。噴霧は多数の液滴により構成され、その燃焼は燃料の蒸発・拡散・混合および燃焼が同時に進行し、互いに影響しあうため、現象をそのまま解明することは困難である。噴霧燃焼を解明するための基礎研究として、単一液滴の蒸発の研究が行われてきた^[1-4]。実機において、噴霧中の液滴蒸発は温度や圧力、気体との相対速度などの影響の他に、火炎からの強い放射の影響を受ける。近年、燃料液滴の蒸発・燃焼の数値解析で放射の影響が考慮されるようになってきたが^[5]、未だ放射加熱による燃料液滴蒸発の実験データは多くない^[6]。

本研究では噴霧燃焼における燃料液滴の蒸発過程に着目し、放射加熱が液滴蒸発に及ぼす影響を調べる。自由液滴による実験が理想的であるが、自由液滴を空間に静止させるのが困難であるため、懸垂液滴による実験を行った。しかしながら、懸垂線が液滴蒸発に及ぼす影響として、放射エネルギーを吸収して液滴を加熱することや、熱伝導により液滴を冷却することなどが懸念される^[7]。本報では、炭化水素燃料および水液滴の放射加熱による蒸発を観察した結果と、実験に使用した金の懸垂線が液滴の放射加熱蒸発に及ぼす影響を報告する。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

実験装置の概略をFig.1に示す。試料として用いる正ヘプタン（沸点371.6 K）、エタノール（沸点351.7 K）および水（沸点373.2 K）が波長の長い光をよく吸収すること^[8]、火炎からの放射には炭酸ガスからの放射が多く含まれていること、波長分布幅が狭くて解析が容易なことなどの理由から、炭酸ガスレーザー（波長10.55 ~ 10.63 μm 、出力35 W）を放射加熱源として用いた。炭酸ガスレーザーからの放射出力はカロリーメータで計測した。炭酸ガスレーザーには焦点距離95.25 mmの凸レンズを取り付け、凸レンズと液滴との距離を変化させることによって放射出力密度を変化させた。放射出力密度 q は、0から1.34 W/mm²の範囲で変化させた。懸垂線には直径10 μm 、長さ14 mmの金線を使用した。液滴の付着力を増大させるため、2本の懸垂線を直交させ、その交点に液滴を付着させた。金の鏡面は、炭酸ガスレーザーの放射エネルギーを99.4%反射する。直径2 mmの穴を開けたアパーチャをレーザーと懸垂液滴の間に設

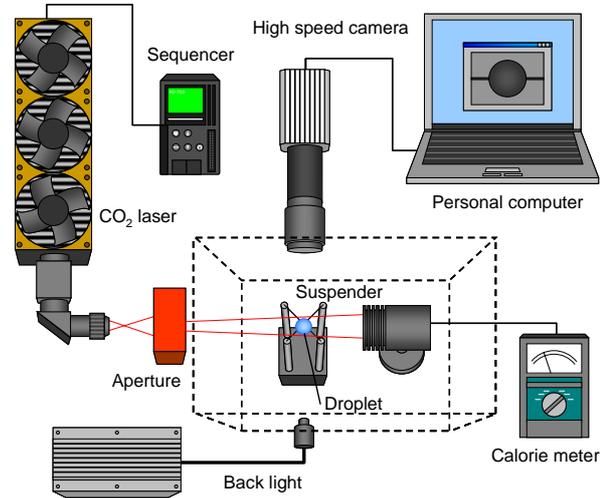


Fig.1 Experimental apparatus.

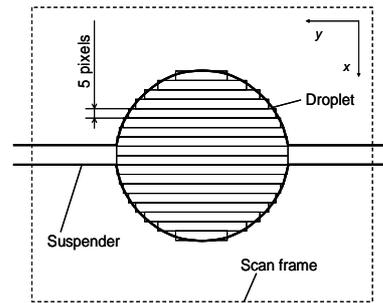


Fig.2 Image processing method.

置し放射加熱範囲を制限した。アパーチャの材料には、放射エネルギーの透過、反射がない煉瓦を用いた。レーザーの始動時出力不安定性を考慮し、暖機後に液滴の放射加熱を開始する。レーザー光を遮断する機構として、ロータリーソレノイドと金属板から構成されるシャッタを設けた。放射開始時刻を明確にするため、シャッタに位置センサを取り付け、シャッタの開閉状態がわかるように画像に赤色レーザーによるマークを示した。実験は室温（300 K）・大気圧で行った。懸垂線が液滴の放射加熱蒸発に及ぼす影響を調べる実験においては、線直径5、10、25 および50 μm の金線を懸垂線として使用し、燃料には正ヘキサン（沸点341.9 K）を用いた。

2.2 画像処理

液滴観察装置として高速度ビデオカメラ（露光時間：2

Experimental Study on Radiative Heating Evaporation of Fuel Droplet and Water Droplet Using a CO₂ Laser

Hitoshi TAKIKAWA, Hiroshi NOMURA, Hiroshi YAMASAKI and Yasushige Ujiie

ms, フレームスピード : 60, 125, 250 fps)を用いた . 液滴の背後に光源を置き, 液滴の輪郭を撮影した . 液滴直径の時間変化の測定は, 1画面あたり横512 ピクセル, 縦480 ピクセル, 輝度256階調のデジタルデータ画像として記録した . 無放射加熱蒸発実験の場合は, CCDカメラ(露光時間 : 0.5 ms, フレームスピード : 30 fps)によって現象を撮影し, デジタルビデオレコーダで記録した . 記録されたデータを, 1画面あたり横640 ピクセル, 縦480 ピクセル, 輝度256階調のデジタルデータに変換し, 計測を行った .

Fig.2 に示すように, 画像をx軸方向に5 ピクセルライン毎に分割し, 分割領域に含まれる5 ピクセルラインの輝度を図中のx軸方向に平均してその分割領域のy軸方向輝度分布を得た . 得られた輝度分布から, 分割領域の雰囲気部平均輝度と液滴部平均輝度を2対1に内分する輝度を示す最もお互いに離れたピクセルの組みの位置を求め, これを液滴の輪郭位置とした . 各分割領域について, y軸方向の液滴輪郭間隔を直径, 分割幅5 ピクセルを厚みとする微小円盤の体積を計算し, これを積算することによって液滴の体積を求めた . 得られた体積と等価な体積の球の直径を液滴直径と定義した .

3. 結果および考察

Fig.3 およびFig.4 に, 放射出力密度が 0.61 W/mm^2 の条件で放射加熱された液滴の連続写真を示す . 初期液滴直径 d_0 は, Fig.3 の液滴が 0.42 mm , Fig.4 の液滴が 0.66 mm である . 両連続写真とも1コマ目は放射加熱を開始した直後の液滴であり, 液滴温度はほぼ室温である . 初期液滴直径が 0.66 mm の場合, 放射加熱開始から180 ms後に爆発していることがわかる . 一方, 初期液滴直径が 0.42 mm の場合, 液滴は初期加熱期間を経た後, 液滴直径が減少し, 完全に蒸発するまで爆発は起こっていない .

Fig.5 (a)に, 放射出力密度が $0, 0.11, 0.36$ および 0.66 W/mm^2 の場合について正ヘプタンの液滴直径履歴を示す . Fig.5 (b)および(c)に, 放射出力密度が $0, 0.09, 0.53$ および 1.15 W/mm^2 の場合について, エタノールおよび水の液滴直径履歴をそれぞれ示す . 初期液滴直径が 0.58 から 0.62 mm の範囲でデータを選んだ . 横軸の原点は放射開始時刻である . 蒸発終了は, 液滴直径が懸垂線直径の4倍となった時刻とした . 蒸発初期には, 液滴に流入する熱が液滴の温度上昇に消費されることや, 液滴が熱膨張を起こすことが原因で, 液滴直径の減少が緩やかな, もしくは増大する現象が観察される . 放射加熱を行わなかった $\dot{q} = 0 \text{ W/mm}^2$ の場合, 各試料とも d^2 法則がよく成り立っており, 直径の時間変化を示す曲線が放物線を横にした型になっている . 正ヘプタンの放射加熱蒸発では, 初期加熱期間を除くと, 直径の時間変化を示す曲線が下に凸であることがわかる . 水とエタノールの放射加熱蒸発においては, 初期加熱期間と最後期を除き, 直径の時間変化はほぼ直線となる . 炭酸ガスレーザーの波長である $10.55 \sim 10.63 \mu\text{m}$ の赤外光に対して, 水, エタノール, 正ヘプタンの順で吸収率が高い . 吸収率が高いほど, 液滴直径の時間変化は直線的になると考えられる .

Fig.6 に放射出力密度を一定とし, 初期液滴直径を変化させて液滴直径の時間変化を調べた結果を示す . Fig.6 (a)

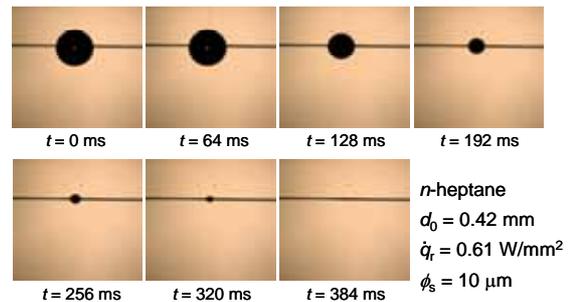


Fig.3 Sequential photographs of evaporating droplet.

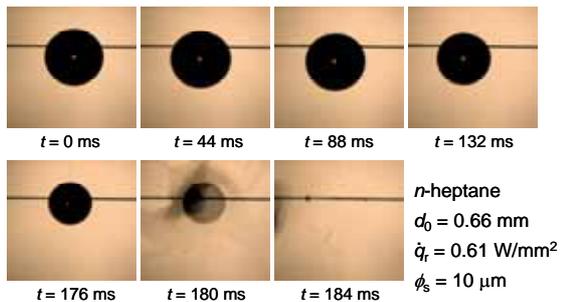


Fig.4 Sequential photographs of evaporating droplet.

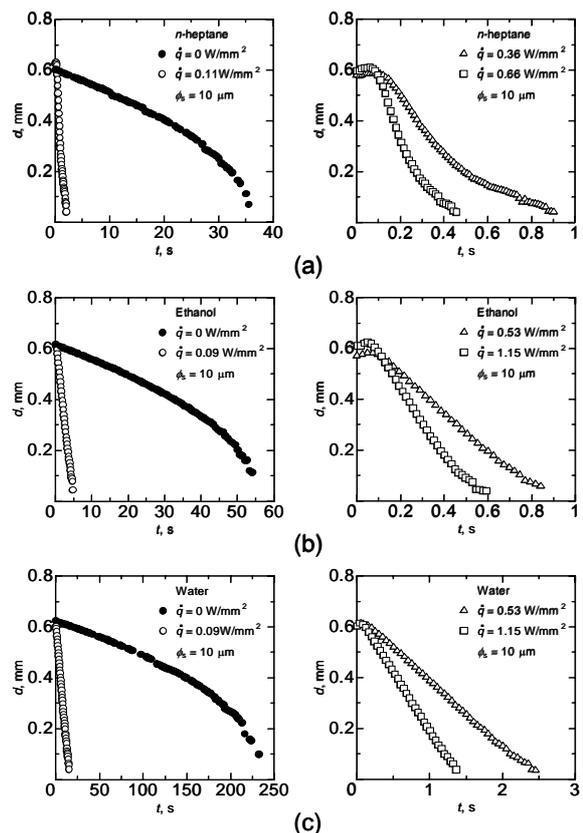


Fig.5 Histories of droplet diameter.

の放射出力密度は 0.42 W/mm^2 , Fig.6 (b)および(c)の放射出力密度は 0.53 W/mm^2 である . 初期液滴直径は 0.4 から 1.0 mm の範囲で変化させた . 全ての条件において, 初期加熱期間で液滴直径の増大がみられ, 初期液滴直径が増大すると初期加熱期間も長くなることがわかる .

Fig.7 は, Fig.6 の縦軸を無次元液滴直径とし, 横軸を修正時間としたものである . 無次元液滴直径とは液滴直径を初期液滴直径で除した値, 修正時間とは時間を初期液滴直

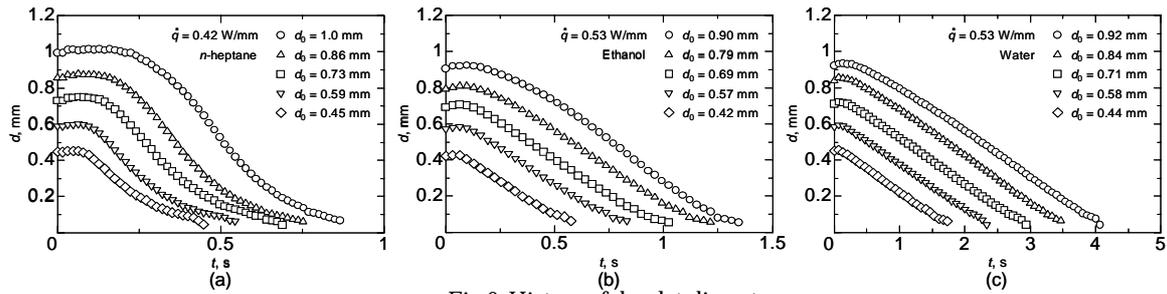


Fig. 6 History of droplet diameter.

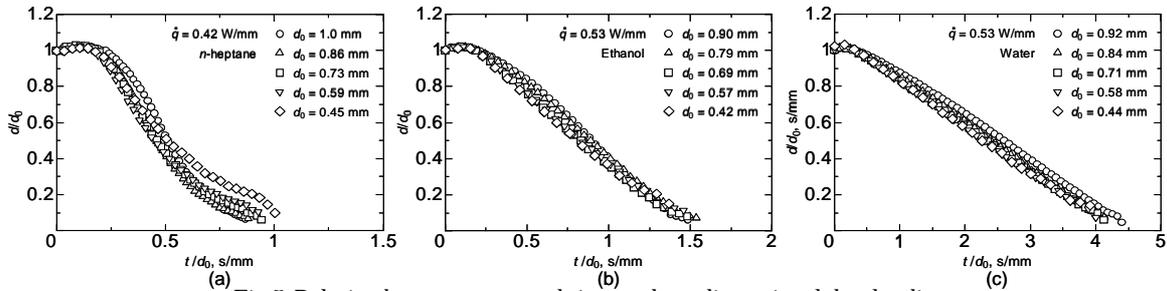


Fig. 7 Relation between corrected time and nondimensional droplet diameter.

径で除した値である。エタノールと水の場合、無次元液滴直径の修正時間に対する変化は、初期加熱期間を含めて、初期液滴直径に依らずほぼ同一の線を描く。これにより、初期液滴直径が0.4から1.0 mmの範囲では、放射出力密度が決まれば、無次元液滴直径の修正時間に対する変化がほぼ一意に決まると考えられる。一方、正ヘプタンの場合、無次元液滴直径の修正時間に対する変化は初期液滴直径に依存しているようである。

液滴蒸発の速さの指標として、一般的には蒸発係数が用いられる。しかしながら、Fig. 5, 6および7からわかるように、放射加熱蒸発の場合は d^2 法則が成り立たないので、蒸発係数は蒸発速さの指標となり得ない。液滴寿命を蒸発の速さの指標として用いることは可能であるが、懸垂線の影響を強く受ける蒸発最後期の蒸発に結果が大きく左右されるので、適当ではないと判断した。本報では、液滴直径が初期液滴直径の半分になる時間 τ_{hd} を蒸発の速さの指標として用いた。初期液滴直径と τ_{hd} の関係を調べた結果をFig. 8 に示す。放射出力密度を副変数とした。エタノールと水の場合、放射出力密度が 0.42 W/mm^2 以上では、初期液滴直径と τ_{hd} がほぼ比例の関係になっていることがわかる。一方、放射出力密度が低い場合、データ点は原点を通る直線には乗らず、初期液滴直径の増大に伴い、 τ_{hd} は傾きを増しながら増大する。

Fig. 8 の曲線から初期液滴直径が0.6 mmの τ_{hd} を求め、放射出力密度と τ_{hd} の関係を調べた結果をFig. 9 に示す。放射出力密度の増大に伴い、 τ_{hd} は急激に減少し、その後緩やかに減少する。正ヘプタンの場合、放射出力密度が 0.66 W/mm^2 よりも大きい条件で、エタノールの場合、放射出力密度が 1.15 W/mm^2 よりも大きい条件で、初期液滴直径が0.6 mm以上の液滴に爆発現象が観察された。水の場合、本報で行った放射出力密度が 1.34 W/mm^2 まで、初期液滴直径が1.0 mmまでの実験範囲では爆発現象は観察されなかった。この事実より、正ヘプタンとエタノールの場合、放射エネルギーは液滴表面のみで吸収しているのではなく、内部でも吸収していることが示唆される。

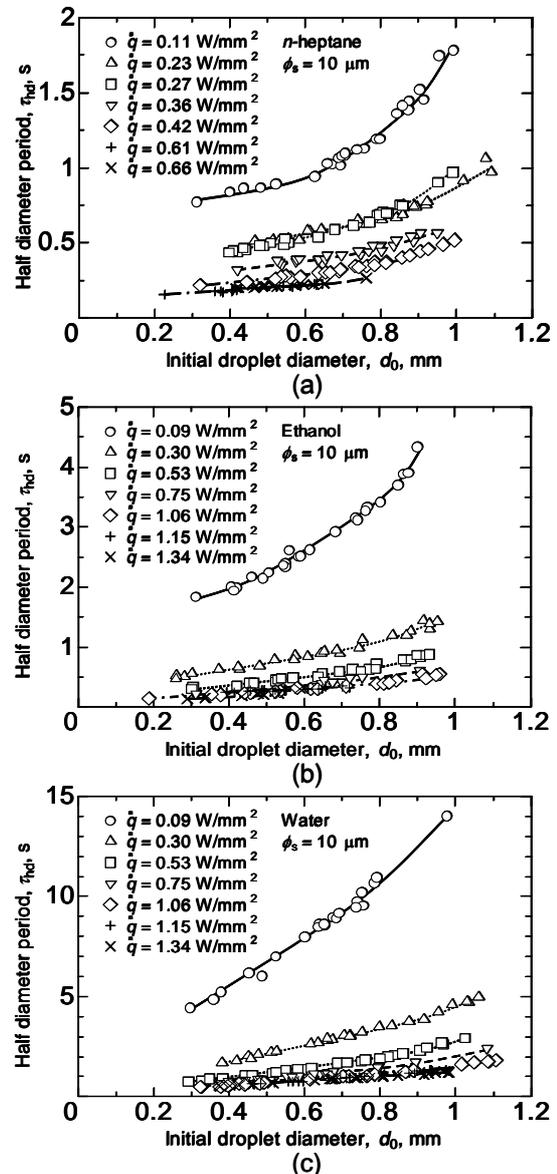


Fig. 8 Effect of radiation power density on relation between initial droplet diameter and half diameter period.

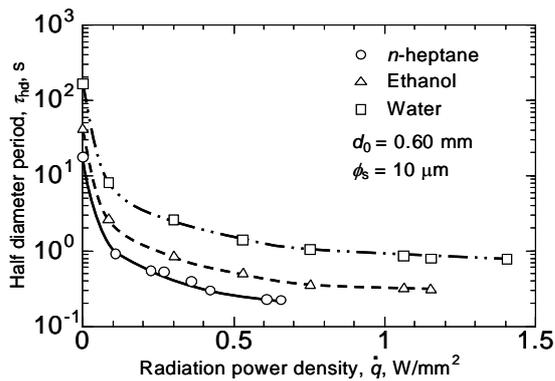


Fig.9 Effect of sample on relation between radiation power density and half diameter period.

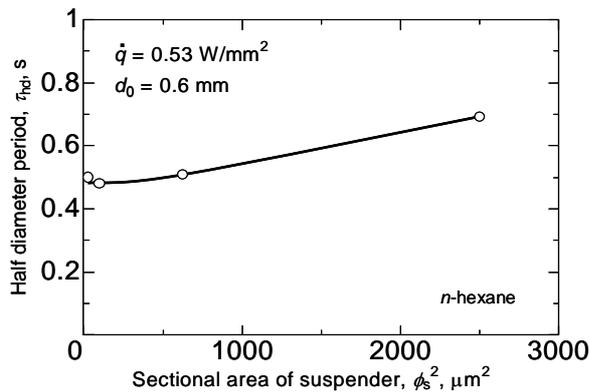


Fig.10 Influence of suspender on radiative heating evaporation of droplet.

正ヘプタンとエタノールの液滴が体積的に放射エネルギーを吸収しているとするれば、放射により液滴に流入する熱流量が液滴直径の3乗に比例することになる。液滴表面から雰囲気中に伝達される熱流量が液滴直径の2乗に比例するので、液滴直径が大きいほど液滴の平衡温度は高くなり、初期液滴直径が大きい場合に爆発現象が観察されることが説明される。水液滴の場合、レーザー光の吸収率が非常に高く、液滴の表面付近で放射エネルギーを吸収するため、爆発現象が観察されなかったものと推察される。

Fig.10 に放射液滴蒸発に及ぼす懸垂線の影響を調べた結果を示す。液滴から懸垂線を伝導して流出する熱流量が懸垂線直径の2乗に比例することを考慮し、懸垂線断面積と τ_{hd} の関係で示した。放射出力密度を 0.53 W/mm^2 、初期液滴直径を 0.6 mm で一定とした。比較的高い放射出力密度で正ヘプタンの蒸発実験を行うと、懸垂線直径 25 および $50 \text{ }\mu\text{m}$ の場合に、液滴が懸垂線上で分裂する現象が観察された。これは、液滴の温度上昇にともなって、液滴と懸垂線の温度差が拡大し、懸垂線近傍の表面張力と懸垂線から離れた液滴表面の表面張力に不均衡が生じ、分裂が起こったと推察された。そこで、太い懸垂線を用いる必要があった本実験においては、燃料に沸点の低い正ヘキサンを用いた。懸垂線直径が増大すると τ_{hd} は増大した。これは、雰囲気より温度の高い液滴から懸垂線を伝導して流出する熱流量が増大したため、蒸発が遅くなったと考えられる。この結果より、懸垂線が放射エネルギーを吸収し、液滴を加熱する

影響は小さいと判断した。懸垂線断面積の小さい範囲では、 τ_{hd} の減少率が小さいことから、放射加熱蒸発の実験には、取り扱いが比較的容易な直径 $10 \text{ }\mu\text{m}$ の金懸垂線を使用することとした。

4. 結言

燃料に正ヘプタン、エタノール、水および正ヘキサンを用い、 CO_2 レーザーによる放射加熱の出力密度を 0 から 1.34 W/mm^2 の範囲で、初期液滴直径を 0.2 から 1.0 mm の範囲で変化させ、単一懸垂液滴の蒸発実験を行った。その結果から得られた知見を以下に列挙する。

- 1) 正ヘプタンとエタノールの場合、初期液滴直径が大きく、放射出力密度が高い場合、液滴は蒸発中に爆発する。
- 2) 放射加熱蒸発の場合、液滴直径履歴は蒸発開始直後の初期加熱期間を除くと、正ヘプタンの場合、下に凸の曲線になる。エタノールと水の場合、ほぼ直線となる。
- 3) 時間を初期液滴直径で除した修正時間に対する無次元液滴直径履歴は、初期液滴直径 0.4 から 1.0 mm のエタノール液滴と水液滴の場合、初期液滴直径に依らず、ほぼ同一の直線を描く。
- 4) 液滴直径が初期液滴直径の半分になるまでの時間を指標とし、同一初期液滴直径の条件で、放射加熱が液滴蒸発に及ぼす影響を調べた。その結果、放射出力密度の増大にともない、液滴直径が初期液滴直径の半分になるまでの時間は急激に減少し、その後緩やかに減少することがわかった。正ヘプタンの場合、放射出力密度が 0.66 W/mm^2 よりも大きい条件で、エタノール液滴の場合、放射出力密度が 1.15 W/mm^2 よりも大きい条件で、初期液滴直径が 0.6 mm 以上の液滴に爆発現象が観察された。
- 5) 液滴を支持するために用いた金懸垂線は、液滴の熱を外部に伝えやすいため、放射加熱蒸発を抑制する。直径が $10 \text{ }\mu\text{m}$ の金懸垂線を使用した場合、懸垂線の放射エネルギー吸収および熱伝導が実験結果に及ぼす影響は少ないと判断された。

参考文献

- (1) 野村 浩司・氏家 康成, 機論 B, Vol. 61, pp. 1834-1840 (1995).
- (2) 野村 浩司・氏家 康成, 機論 B, Vol. 61, pp. 4137-4143 (1991).
- (3) 廣光 永兆・川口 修, 機論 B, Vol. 63, pp. 1680-1692 (1997).
- (4) 岡崎 卓郎・五味 丸典, 機論 B, Vol. 19, pp. 1-6 (1953).
- (5) 斉藤 武雄・山崎 浩司・Raymond VISKANTA, 機論 B, Vol. 57, pp. 1485-1490 (1991).
- (6) 瀧川 仁志・野村 浩司・氏家 康成, 第 13 回微粒化シンポジウム・講演論文集, pp. 151-154 (2004).
- (7) 工藤 一彦・黒田 明慈・田中 建・Wen-Jei YANG, 機論 B, Vol. 62, pp. 763-769 (1996).
- (8) 堀口 博, 赤外吸光図説総覧, pp. 19, 117 (2001).