

生命・生物流体の輸送・混合過程に関する研究

山崎 博司（機械工学科）

1. 序説

生命工学分野における近年の革新を広く人類に貢献させていくには、生命、バイオ物質の生産および応用技術の有効な連結が重要である。光合成は光エネルギーを用いた化学物質の分解、合成であり、細菌内にそれらの機能を有するものを光合成細菌と称する。また光合成は植物生産においても有効に機能しており、エネルギー転換手法の一つとして考えることにより、有効なクリーエネルギーとなりうるものである。光合成機能を有する生命体には、植物および光合成細菌がある。光合成細菌はその生命活動の一環として、有機物を分解し、水素を排出する。水素は酸化反応によって二酸化炭素を排出しないことから、化石燃料の代替として新世代内燃機関、燃料電池など、次期移動体動力源などの主力として注目されている。しかしながら生産コストおよび運用面での困難さから常用燃料として用いられるには至っておらず、現在これらの課題を克服すべく取り組みがなされ、今後はさまざまな場面において水素発生源の必要性が増してくるものと考えられる。一方、人類の生命活動や社会活動ではさまざまな側面でも有機物が発生しており、資源循環型社会の確立にはエネルギー問題への対応のみではなく、有機物転換をエネルギー問題に関連させる観点が有効な方法とひとつと考えられる。他方、地球温暖化対策の一環として、近年植物起源燃料であるバイオエタノール利用が促進されている。このようなバイオ起源燃料についても今後より効率の良い有効利用を図っていくことは資源循環社会の重要な要素となるものといえる。

本研究は生命工学的見地から、資源循環型エネルギー源の開発・有効利用に着目したものである。ここでは嫌気性光合成細菌 *Rhodobacter sphaeroides* RV 株を利用した有機物質からの水素生産¹⁾、およびバイオエタノールを燃料利用する場合の混合燃料の燃焼性について検討を行った。前者については、特に培養装置に必要な諸元決定の基礎データとして、培養環境の検討を行った。また後者については従来の化石代替燃料の一つである乳化燃料²⁾にエタノールを添加した場合の影響について検討を行った。

2. 光合成細菌を利用した水素生産における温度測定による生産量予測

2.1 はじめに

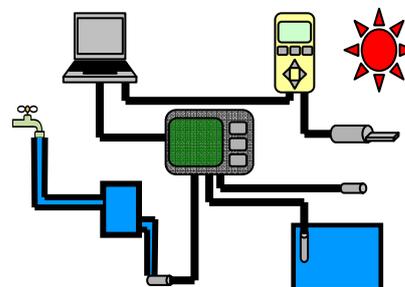
生命活動を用いた水素生産においては、生産密度、生産速度は工業的手法に比べては高くはないのが現状である。嫌気性光合成細菌 *Rhodobacter sphaeroides* RV 株を利用した有機物質からの水素生産の実用化のためには、エネルギー源は周囲

環境である太陽光、外気温度に依存することが望ましい。よって、屋外培養条件を検討するために、培養装置の照明や恒温水槽の管理システムの構築を目的としたものである。その第一段階として入射エネルギーや外気温、水温を同時に連続して測定できるシステムを構成した。実験は夏季、冬季における太陽光の入射エネルギーと高温、低温熱源温度を測定し、既往の水素生産実験結果から、日射光を用いた場合の水素生産量を予測した。

2.2 実験装置および方法

測定は光合成に使用される日射エネルギー、高温熱源としてタンクに貯水された水の水温、低温熱源として使用する流水温度について行った。実験装置概略を Fig.1 に示す。装置は光パワーメータ、データロガー及びパーソナルコンピュータから構成されている。装置のコントロール及びデータの保存はパーソナルコンピュータにより行った。光パワーメータおよびデータロガーは Microsoft Visual Basic 6.0, midi LOGGER Software V 1.32 により制御した。気温、水槽温度及び流水温度は K 型熱電対により測定した。

実験は、2007 年夏季（主として 8 月 8 日から 8 月 9 日）および冬季（主として 12 月 16 日から 12 月 18 日）で行った。測定場所は、日本大学生産工学部（千葉県習志野市）12 号館屋上である。水槽には容積 0.027 m³ のアクリル製容器を用い、水 20 l を静置貯水し、水分蒸発による温度低下防止のため上部を透明シートで覆った。流水には水道水を用い、水量を 2 l/min とし、出口部における水温を測定した。光パワーセンサは水平上向きで固定し、日射エネルギーを波長 390 nm~1090 nm を 20 nm 間隔で測定した。入射エネルギー及び各温度の測定は 10 分間隔とし、温度は 10 秒間の平均値とし、プログラムにより測定を行った。



- | | |
|------------------|-----------------------|
| ① Data Logger | ② Thermocouple |
| ③ Reservoir | ④ Optical power meter |
| ⑤ Optical sensor | ⑥ Personal computer |
| ⑦ Pipe line | |

Fig.1 Schematics of experimental apparatus.

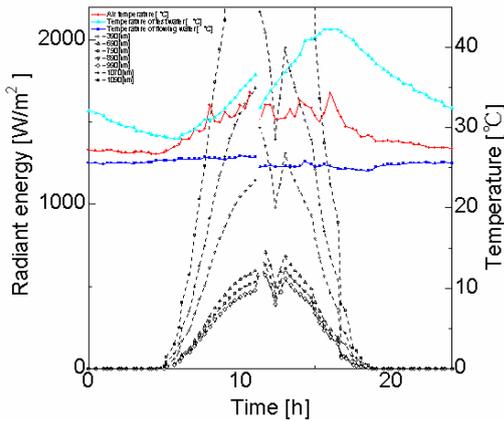


Fig.2 Daily radiant energy and temperature in summer.

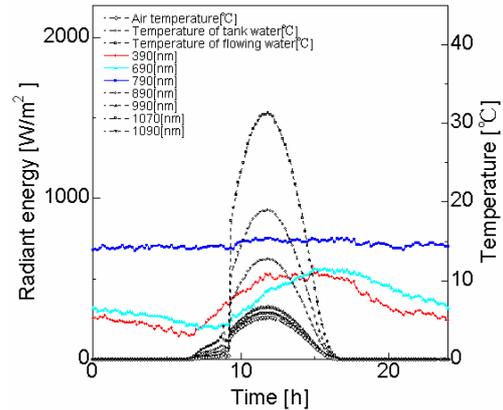


Fig.3 Daily radiant energy and temperature in winter

2.3 実験結果および考察

Fig.2 に夏季晴天時の測定結果を示す。夜間においては遠赤外光も含めて光エネルギーは検出されず光合成の可能性はないことがわかる。日射エネルギーは日出と共に増大をはじめ南中時にピークを示す。赤外域の光量が非常に大きいことがわかる。また南中直後の日射量の一時的な減少は雲による遮りであり、曇天時においても相当量の光エネルギーが期待できることがわかる。水温は貯水温は最高温度で 43 °C に達しており、保温により高温熱源として使用が可能と考えられる。

Fig.3 は冬季晴天時の測定結果である。晴天日の日射エネルギーのピーク値は夏季の約半分である。また温度条件についても流水温は約 14 °C で変動がないものの、貯水温は外気温とほぼ連動して変化し、日射エネルギーからの受熱は小さいと推察できる。また曇天時での測定結果では、曇天日は晴天日に比べ南中をピークとする太陽高度の影響は顕著ではなく、かつ日射量のピーク値は晴天時の約 50% であった。以上の結果から冬季については十分な日射量確保は困難であるとともに、何らかの熱源が必要であると考えられる。

Fig.4 に日射エネルギーの波長分布を示す。日射エネルギーは夏季、冬季において紫外域から赤外域まで同様な分布を示し、曇天時においても変わらなかった。また室内での水素生産実験に使用したハロゲン光源についても同様な分布を有していることが確認できる。

Fig.5 は培養液 1 リットルを用いた回分培養実験における水素生産率の時間変化である。回分培養開始 10 時間後に水素を発生し、35 時間後にはピーク値に達する。その後発生割合は一定値を示し、80 時間後より減少に転ずる。以上の結果から菌体状態を最適に保てると仮定した日射データを適用した際の 120 時間あたり水素生産量は夏季、冬季(晴れ)及び冬季(曇り)でそれぞれ 1294 ml、414 ml 及び 231 ml となる。夏季における水素生産量は、ハロゲンランプにより 24 時間光を照射し続けた培養実験で得られた 1240 ml よりも若干上回り、日照時間が約 10.5 時間で

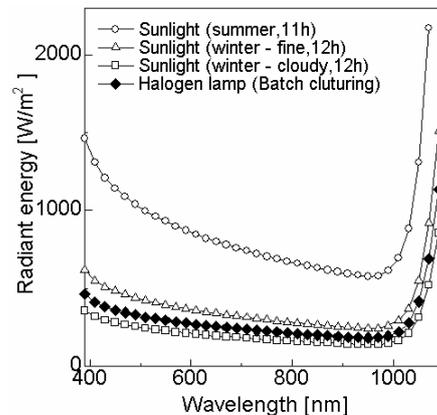


Fig.4 Radiant energy distribution of sunlight.

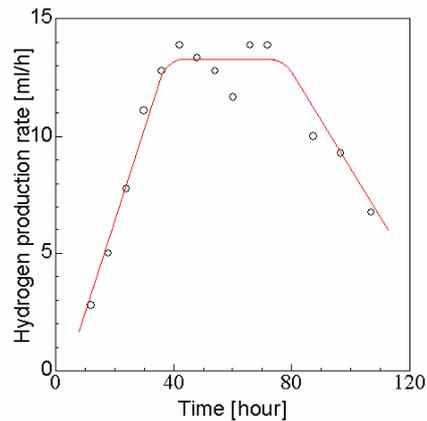


Fig.5 Hydrogen production rate.

ありながら、日射エネルギー量は、回分培養実験での照射エネルギー量を上回る。夏季条件では屋外における水素生産はハロゲン光源の場合よりも多い水素生産量が期待できるものの、冬季においては、光源および熱源ともに十分とはいえない状況と考えられる。

2.4 まとめ

屋外培養条件を検討するために、夏季、冬季における太陽光エネルギーと高温、低温熱源温度を

測定した結果、光合成細菌による水素生産は夏季条件では高熱源の確保ができれば可能であることを確認した。また培養液 1 リットル、1 日あたりの水素生産量を算出した。

3. アルコール添加乳化燃料液滴燃焼時のマイクロ爆発特性

3.1 はじめに

アルコールは極性を有しており、炭化水素と混合した場合、条件によっては溶解せず、相を成す。またそれらを均一に混合した場合、その構造は乳化状態となり、その燃焼過程で二次微粒化が発生することも知られているところである。アルコール-炭化水素燃料の燃焼過程については、懸垂液滴、自由液滴などを対象として研究が行われてきた。しかしながら界面活性剤の問題から多くは行われていない。また水/炭化水素乳化燃料の液滴燃焼過程については、基礎的研究から噴霧における応用研究まで幅広く行われているものの、十分な知見が得られているとは言い難いのが現状である。一方、燃焼過程においては燃焼音や圧力波を AE 信号から解析しようとする取り組みもなされ、待ち時間分布に加え、内部沸騰のエネルギー分布についての知見も得られるようになった。

アルコール成分は乳化解離剤として使用されることもあり、乳化燃料を不安定化させる要因を有している。一方、適切な界面活性剤を選択し含有量を調製することにより、比較的安定なアルコール含有水乳化燃料の作成が可能である。よって本研究では、乳化燃料にアルコール成分を少量添加した場合についての液滴燃焼過程について検討を行うこととした。ここでは特に、マイクロ爆発発生分布およびマイクロ爆発エネルギー分布、相分離過程について報告する。

3. 2 実験装置および方法

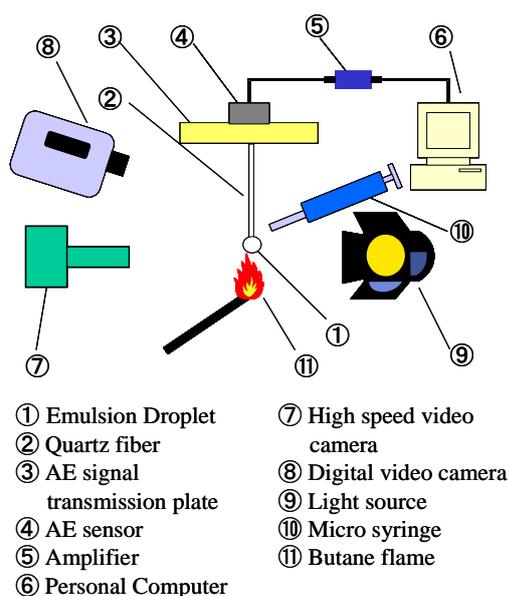


Fig.6 Schematics of experimental apparatus for combustion experiments

図 6 に実験装置の概略を示す。実験装置は燃焼実験装置、可視化系、AE 測定系から構成される。燃焼実験装置は、懸垂線が取り付けられている測定部およびその支持部、および点火系から構成される。懸垂線は先端を球形に加工した直径 0.25mm は石英線であり、直径 100mm、厚さ 5mm の黄銅製円盤の中心位置に、垂直に取付けられている。円盤は、下部支持台より垂直に立てられた先端角 30° の位置決めピンにより 3 点支持で水平位置に保持されている。可視化系は、高速度ビデオカメラ、デジタルビデオカメラおよび光源で構成した。高速度ビデオカメラは光源に対面して設置して液滴内の沸騰挙動および液滴の分裂、崩壊過程を 500 コマ/s または 1000 コマ/s、1/10000 s にて記録させた。デジタルビデオカメラは光源から 90° 方向に設置し、火炎挙動および液滴挙動を 30 コマ/s、1/5000 s で撮影を行った。AE センサは、懸垂線取付側反対面に、懸垂線延長線を中心軸として取付けられている。本研究で使用した AE 測定系は AE センサ、増幅器、DSP、パーソナルコンピュータで構成されており、収集したデータは専用ソフトウェアによって処理される。分解能は 16bit、バッファ容量は 4 k word とするとともに、wave モードまたは event モードで計測を行った。サンプリング周波数は 200kHz である。

ベース燃料には n-ヘキサデカン (試薬特級) を使用し、純水およびエタノール (試薬特級) を混入させた。界面活性剤にはポリオキシエチレンアルキルエーテルを使用した。ベース燃料の体積割合をそれぞれ 0.7 と一定として、水、エタノール混合の割合を変化させて供試燃料を調製した。エタノール (試薬特級) の含有率 c_a を 0、0.03、0.05 であり、界面活性剤の体積比率は 0.03 である。これらの試料は所定の体積比率で混合し、マグネチックスターラでかくはんして、エタノール含有乳化燃料 (以下、燃料) を調製した。実験は、室温、大気圧下、静止空気中において行った。初期液滴直径 $d_0=1.5\text{mm}$ とし、供試液滴をマイクロシリンジにより懸垂した後、小ボタン炎によって点火を行った。30 個以上の液滴について点火から燃焼終了時まで燃料液滴内で生じる現象を観察するとともにマイクロ爆発および液滴内沸騰が発生するまでの待ち時間を計測し、可視化結果と燃焼過程で得られる AE 信号を対応させた。またマイクロ爆発のエネルギーに対応する指標として AE 信号のピーク電圧を用い、その統計的性質について検討を行った。

3.3 実験結果および考察

図 7 にエタノール含有水乳化燃料の顕微鏡写真を示す。図からベース燃料を少量の添加水が包含した水中油滴形乳化であることがわかる。アルコール/n-ヘキサデカン混合の結果、両者はほとんど混合、

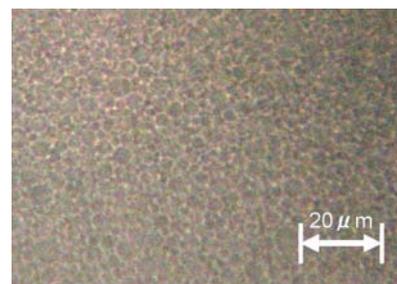


Fig. 7 Microphotograph of a burning emulsion droplet. ($c_a=0.03$, $c_w=0.24$)

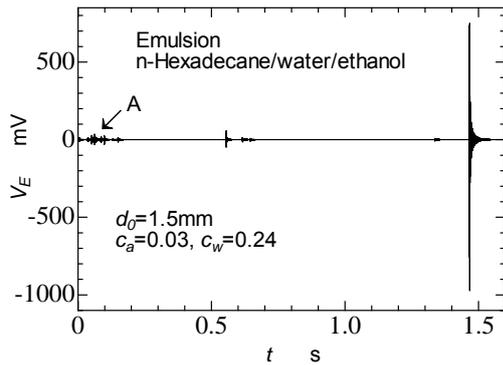


Fig.8 Typical AE signal of a burning emulsified fuel droplet ($c_a=0.03$, $c_w=0.24$)

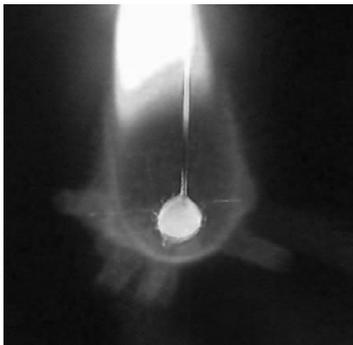


Fig.9 Observed results of flame phenomena in the initial stage of the combustion of ethanol-water emulsified fuel droplet.

溶解しないことが確認されており、添加したアルコール成分は n-ヘキサデカン滴周囲の水分相に混合しているものと推察される。油滴直径は $2\sim 10\mu\text{m}$ であり、水分相の厚さは $3\mu\text{m}$ 以下であった。

図 8 にアルコール含有乳化燃料液滴の燃焼過程の AE 測定結果の例を示す。図において横軸は点火からの時間であり、縦軸は AE 信号値である。既報で報告したと同様にマイクロ爆発発生前に内部での沸騰が確認できる。一方で図中 A に示すように点火直後に信号を検出する傾向が見られた。図 9 はその時点における火炎画像である。火炎下部において、火炎の放射状変形が確認できる。高速度撮影の結果から、これらは液滴からの小液滴の飛び出しによるものであった。液滴点火直後の沸騰については水乳化燃料においても観察されているものであるが、アルコール含有させることにより、その発生が顕著であることがわかる。

図 10 にマイクロ爆発発生の待ち時間分布を示す。含水率 27%の水乳化燃料では、分布関数が発生初期に立ち上がり、その後緩やかに増加する傾向が見られた。一方、3%エタノールを含有させた場合、初期の立ち上がりは認められず、発生直後の立ち上がりは小さく、その後急激に増加する傾向が確認できる。この傾向は 5%含有させた場合についても同様であった。前者の傾向は、溶存期待を含有する乳化燃料の見られる傾向であって、本報においては脱気処理を行っていないことから、界面活性剤量を増加させ、高含水率の場合に溶存気体量が増加していることが推測される。一方、エタノール添加の場

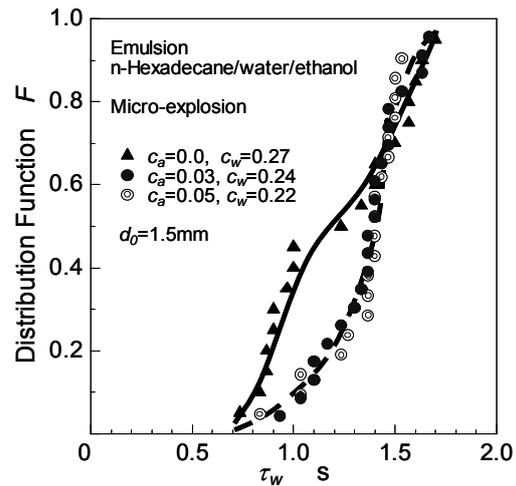


Fig.10 Distribution function of micro-explosion events in a burning ethanol-water emulsified fuels (effect of ethanol contents)

合にはその傾向は見受けられない。また三者ともマイクロ爆発発生域後半では一致した分布となっていることがわかる。

3. 4 まとめ

エタノールを添加したヘキサデカン/水乳化燃料液滴のマイクロ爆発について検討した結果次の結論を得た。

- (1) エタノール添加乳化燃料液滴のマイクロ爆発発生分布関数では初期の発生度数が小さい。
- (2) エタノール添加乳化燃料液滴のマイクロ爆発の発生エネルギーは高くなる傾向がある。

4. 展望

以上の検討結果から、光合成細菌を用いた水素生産を屋外環境で行うために必要となる光量および高温熱源および低温熱源温度の変動を明らかにした。これらより、我が国のような高緯度地域での光合成水素生産には光量、熱源等の面で有利ではないことが明らかとなった。ここで構築した計測システムはネットワークによる遠隔実験に拡張しうる仕様であり、今後は最適な地域環境等の特定とそれらの遠隔データに基づいた水素生産実験に筋道を開いていくことが有用と考えられる。一方、乳化液滴燃焼へのアルコール添加の影響を調べた結果、マイクロ爆発発生を制御しうる条件が存在することが明らかとなった。このことにより、アルコール添加を化石燃料および代替燃料の燃焼制御を行うための添加燃料としての位置づけを示唆するものとして評価される。

参考文献

- 1) 例えば Wakayama T. and Miyake J., Light shade bands for the improvement of solar hydrogen production efficiency by Rhodospirillum rubrum, Int. J. Hydrogen Energy 27 (2002) 1495 – 1500.
- 2) 例えば, Kadota. T and Yamasaki, H., Recent Advance of Combustion of Water-Fuel Emulsions, Prog. Energy Combust. Sci., 28., (2002), 385-404.