

環境技術開発を基盤とした 持続可能な環境経営システムの構築に向けて 第5報

榎本恵一¹ 角 克宏² 松元信也³ 有賀 修⁴ 桂 信太郎⁵ 永野正朗⁶
那須清吾⁷ 大濱 武⁸ 堀澤 栄⁹ 両角仁夫¹⁰ 井上喜雄¹¹ 富澤 治¹²
平野 真¹³ 草柳俊二¹⁴ 馬淵 泰¹⁵

(受領日：2012年5月9日)

高知工科大学 大学院工学研究科
〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口185

E-mail: ¹enomoto.keiichi@kochi-tech.ac.jp,
²sumi.katsuhiko@kochi-tech.ac.jp, ³matsumoto.nobuya@kochi-tech.ac.jp,
⁴ariga.osamu@kochi-tech.ac.jp, ⁵katsura.shintaro@kochi-tech.ac.jp,
⁶nagano.masao@kochi-tech.ac.jp, ⁷nasu.seigo@kochi-tech.ac.jp,
⁸ohama.takeshi@kochi-tech.ac.jp, ⁹horisawa.sakae@kochi-tech.ac.jp,
¹⁰morozumi.yoshio@kochi-tech.ac.jp, ¹¹inoue.yoshio@kochi-tech.ac.jp,
¹²tomisawa.osamu@kochi-tech.ac.jp, ¹³hirano.makoto@kochi-tech.ac.jp,
¹⁴kusayanagi.shunji@kochi-tech.ac.jp, ¹⁵mabuchi.yasushi@kochi-tech.ac.jp

要約：太陽光発電とバイオマスによるエネルギー生産は、今後の自然及び再生可能エネルギー源利用の中心となる技術である。色素増感太陽電池は低コストを特徴とするが、光電変換効率の向上が課題とされている。色素層を多層化することによる変換率の向上を検証した。バイオマスを原料とするバイオエタノール生産の実用化には、アルコール発酵の高効率化が必須とされている。ブドウ等の種子粉碎物を添加することにより、発酵速度及び生成アルコール濃度が著明に増大することが見出された。また、海藻を原料とするバイオエタノール生産に用いられる寒天分解酵素の技術開発について述べ、バイオエタノール生産の可能性を論じた。さらに、木質バイオマス事業の例を取り上げ、地方における産業創造の戦略について考察した。

1. はじめに

第4報⁽¹⁾では、食用作物残渣からのアルコール発酵と石油生産藻からの燃料生産について報告した。このようなバイオマスエネルギーの利用や、太陽光、風力、地熱を含む未だ十分活用されていない自然エネルギーの利用が環境経営を成立させる重要な要素の1つとして認識されており、これらは化石燃料によるCO₂排出量の低減を図る技術として開発が進められてきた。しかし、これらのエネルギー源の多くは、広く薄く分散しており、そのエネルギー密度は化石燃料や原子力と比べて圧倒的に低く、それ故基幹的なエネルギー源とは成り得ないと見なされてい

た面がある。ところが、2011年3月11日に起こった東日本大震災とそれに伴う原子力発電所の事故は、我が国にそのエネルギー政策の根本的な見直しと再構築を迫ることとなった。このような状況の中で、バイオマスと自然エネルギーを各地域の環境経営に組み入れ、今までの大規模、集中型に代わる、小規模、分散型のエネルギー体系を創りだそうとする試みが始まっている。今回は第4報に引き続き、重要性を増しつつあるエネルギー源として、太陽光発電及びバイオマスエネルギーについて報告する。同時に地方の産業創造のモデルとして木質バイオマス事業の経営とその戦略について述べる。

2. 双性イオン型ポルフィリン亜鉛錯体を多層膜吸着させた色素増感太陽電池

2.1 序論

2011年3月11日に起こった東日本大震災が引き金となり発生した福島第一原子力発電所の事故は日本のエネルギー政策の根幹を揺るがす結果となった。これまで、エネルギー政策の位置からは端に追いやられ、温室効果ガス抑制の観点から語られることの多かった太陽電池が、エネルギー政策における原子力の中心的役割が揺らいでいることにより、1970年代の石油危機以来、再びエネルギー源として脚光を浴びることとなった。

現在では太陽電池には数多くの種類があるが、そのうちシリコン太陽電池が比較的高い効率と耐久性から実用化され、一般に市販されていることは誰もが知るところである。単結晶シリコンでは20-24%と比較的高い効率を示すが、価格が高いことが欠点である。多結晶シリコンでは15-18%とコストと性能のバランスが良い。アモルファスシリコンでは、コストが低いと性能が約10%と低い。

また、シャープが開発したInGaAs太陽電池は化合物系太陽電池とよばれ、更に効率が35.8%と高くなる。このような化合物系太陽電池を使って、レンズや鏡により集光した強い光を当てると、40%以上の高効率を得られるが、コストは非常に高価なものになる⁽²⁾。

こういった無機材料を使った太陽電池は一般に高価であるため、低コストが特徴の有機材料を用いた太陽電池が1990年代になって注目されるようになってきた⁽³⁾。これらの電池は次世代型太陽電池とよばれ、有機薄膜太陽電池と色素増感太陽電池がそれにあたる。これらの次世代型太陽電池は家屋の屋根などの弱い光を使った発電では、多結晶シリコン太陽電池の電池効率に近づきつつあり、また、屋内での発電では電圧が下がらず効率も落ちないという特徴を持っている。有機薄膜太陽電池とは、電子供与性分子（ドナー分子）と電子吸引性分子（アクセプター分子）を組み合わせ、光吸収によりドナー分子からアクセプター分子への電子移動を誘起し、この分極を各両端の電極に誘導し、太陽電池として発電する仕組みになっている。現在、日本企業が開発した材料を用いて11%の効率の有機薄膜太陽電池が作製されたと報じられている⁽⁴⁾。

もう1つの有機材料を用いた太陽電池は、本研究の主題である色素増感太陽電池（DSSC）とよばれるものである。多孔性のナノ粒子酸化チタンをガラス電極上に焼成させた酸化チタン電極を色素溶液に

浸漬させ、色素を吸着させる。この酸化チタン電極と対極との間に電解質溶液（I₃⁻/I⁻）を挟んで光を照射すると、光吸収した色素の励起状態から酸化チタンの伝導帯への電子移動が起こり、光電流が引き起こされるのである。現在、この方式で最も高い効率は12%が報告されている⁽⁵⁾。

DSSCでは、通常、色素を単分子層吸着させた電極が最も効率が高いと考えられてきたが、色素によっては多層膜吸着させた方が高いことがある。本研究では、双性イオンを用いたポルフィリン亜鉛錯体の多層膜化を検討し、その光電流特性を検討した。

2.2 実験

双性イオン型ポルフィリン亜鉛錯体（図1、ZnTSPPyP）は、テトラピリジルポルフィリン亜鉛錯体をプロパンサルトンと反応させて合成した。ZnTSPPyP 0.5 mgをメタノール1 mLに溶かし、アセトニトリル30 mLに希釈した溶液を浸漬液とした。FTOガラスにナノ粒子酸化チタンゾルを塗布し420°Cで焼成させ、酸化チタン電極（TiO₂/FTO）を作製した。

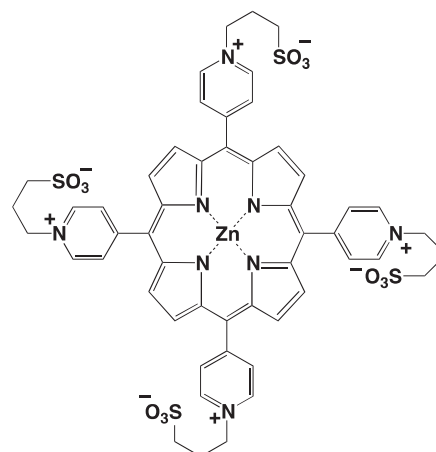


図1 双性イオン型ポルフィリン亜鉛錯体（ZnTSPPyP）

2.3 結果および考察

酸化チタン電極を浸漬液に1時間および24時間連続浸漬させたところ、錯体の吸着量には大きな違いが見られず、浸漬時間の増加による色素の多層膜化は起こらなかった。しかし、1枚の酸化チタン電極を逐次浸漬法により、浸漬と吸光度測定を交互に行うと、色素が累積時間とともに、多層膜化しているように見える。この2つの一見矛盾した現象は、浸漬時間ではなく、浸漬後乾燥させることによって表面が改質し、吸着が進行したと考えると理解できる。

そこで、1枚の酸化チタン電極を1時間浸漬後、30分乾燥した。この操作を1回とし、乾燥の間に吸収スペクトルを測定した。

この操作を3枚の酸化チタン電極で、それぞれ1、3、5回行ったところ、図2に示すように回数とともに酸化チタン電極の吸光度の増加がみられた。このことはZnTSPPyPが溶液中では分子内イオン対を形成しているが、酸化チタンは分極しているため吸着するとき、分子内イオン対が解離し静電相互作用により吸着する。酸化チタンと相互作用していないスルホン酸基は分子内イオン対を形成しているため、連続浸漬では多層膜吸着が起こらないと考えられる。そして、乾燥時においては水分が最終的に残るため分子内イオン対が解離し分極して固定化する。再び浸漬させるとき、分子内イオン対を形成していたスルホン酸基が静電相互作用により解離し、分子間イオン対を形成して多層膜吸着が起こると考えられる。この酸化チタン電極を用いて色素増感太陽電池を組み、光電変換効率 (IPCE) を測定したところ

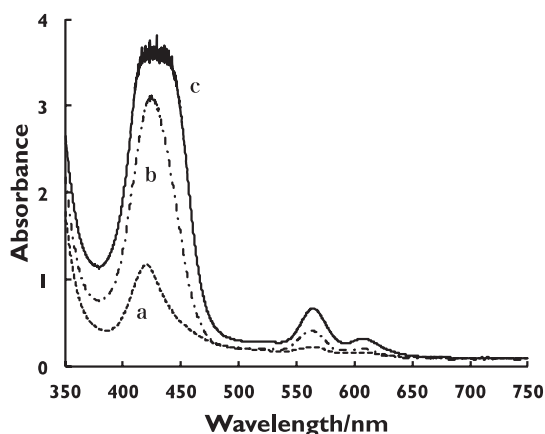


図2 浸漬回数と酸化チタン電極の吸収スペクトル a. 1回; b. 3回; c. 5回

ろ、多層膜である方がIPCEが大きい傾向はあったが、IPCEの値は安定しなかった (図3)。420 nmの光を照射し続けると、IPCEは図3の挿入図に示すように徐々に減少した。これは、図4に示したようなメカニズムにより分子間イオン対から分子内イオン対へ変換が起こったためと考えられる。すなわち、光照射によって誘起された電子移動反応によって (図4上段)、イオンバランスが崩れ、それを補償するために分子間イオン対から分子内イオン対へ変換し、酸化還元反応の終了後 (図4中段)、色素が中性となり (図4下段)、次の光誘起電子移動が起こったとき、イオンバランスを補償するイオンがない

ため逆電子移動反応が大きくなり、IPCEが減少したと考えられる。

従って、色素吸着量やIPCEを増大させるためには、分子内イオン対を解離させ、分子間イオン対を形成しやすいようにすれば良いことが分かる。そこで、色素溶液に有機溶媒に可溶性な塩である過塩素酸テトラブチルアンモニウム (TBAP) を添加し、これを浸漬液として、3枚の酸化チタン電極をそれぞれ3、4、5時間と連続浸漬させ、吸収スペクトル測定を行った (図5)。3、4時間の連続浸漬では、大きな差はなかったが、5時間の連続浸漬では、一

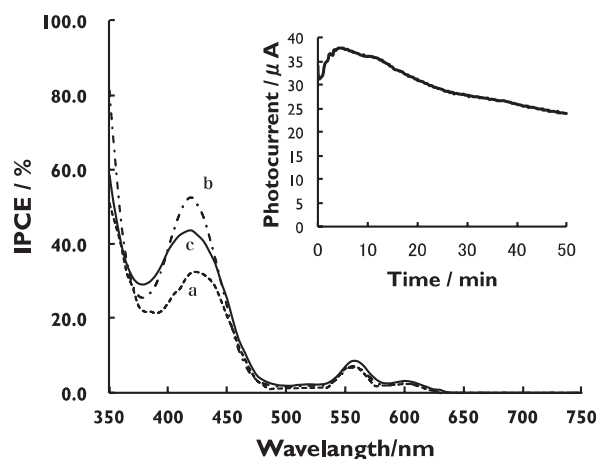


図3 DSSCにおけるIPCE作用スペクトル
浸漬回数: a. 1回; b. 3回; c. 5回 (挿入図: 420 nmの光照射における光電流の時間変化)

挙に多層膜吸着が進行し、結晶化と類似した現象が確認された。この5時間の連続浸漬した電極で色素増感太陽電池を組み、IPCEを測定したところ、図6に示したように吸収ピーク位置で60%を超える安定したIPCEをあたえる作用スペクトルが得られた。また、420 nmの光を照射し続けても、光電流値は低下することなく流れ続けることも分かった。これらのことから、塩の添加により分子内イオン対が解離し、分子内に存在するカチオンとアニオンが塩のアニオンとカチオンとそれぞれイオン対を形成し、これによりイオンを共存させるとともに分子間イオン対を形成しながら、酸化チタン上に多層膜吸着されたと考えられる。その多層膜内には塩が共存するため、光照射後、電子移動反応が起こって電荷バランスが偏っても、すぐ近傍のフリーなイオンが電荷バランスを是正し、色素間での逆電子移動反応が起こりにくくなっていると考えられる。また、この高いIPCE値は色素間での電子移動反応がそれほど遅くなっていないことが考えられ、従来の単純なHO-

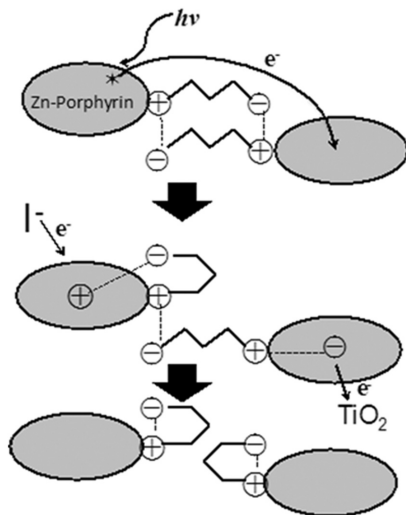


図4 光照射による分子間イオン対から分子内イオン対への変換のメカニズム

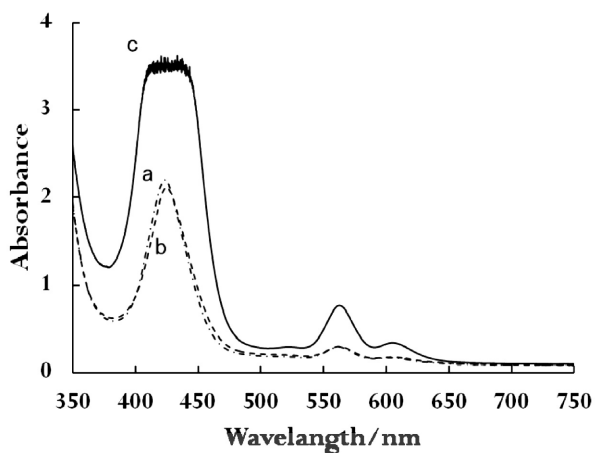


図5 TBAPを添加したZnTSPPyPのアセトニトリル溶液に連続浸漬させた後の酸化チタン電極の吸収スペクトル
浸漬時間：a. 3 h; b. 4 h; c. 5 h

MO-LUMOによる電子移動反応は考えにくい。この系では、フリーイオンが多層膜内に存在することにより、多層膜内に電位勾配が生じ、このため色素から酸化チタンへの電子移動反応がそれほど遅くならなかったと推測される。更に、多層膜表面の色素が光吸収し、電子移動反応が起こった場合、膜の外側にホールが存在し、酸化チタンとの距離が長くなる。このため、酸化チタンからの逆電子移動反応が抑制されたために、結果として高いIPCE値を与えたと考えられる。

今後、この系で更なる多層膜化を進め、最終的にどこまで多層膜化が進むとIPCEの最大値が得られ

るのか、その限界点を探る必要がある。

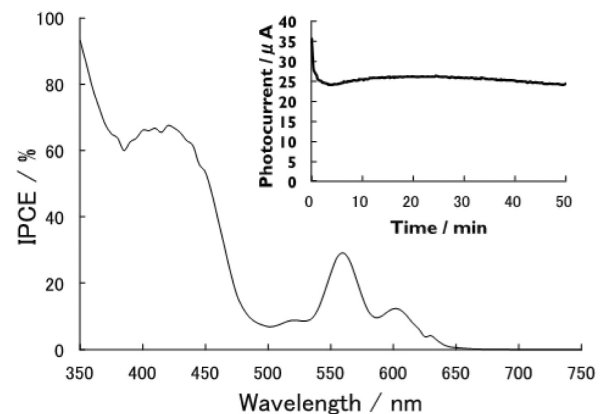


図6 TBAP-ZnTSPPyP溶液系DSSCにおけるIPCE作用スペクトル、浸漬時間：5 h (挿入図：420 nmの光照射における光電流の時間変化)

3. 種子類を利用したバイオエタノールの省資源的高効率発酵技術の開発

地球温暖化対策の1つとして期待されているバイオエタノールの実用化にとって、原料が何であれ、発酵プロセスの省資源化と高効率化は重要な課題であり、種々の検討が活発になされている。

バイオエタノールの発酵生産工場は、バイオマス資源の豊富な東南アジアをはじめとする熱帯及び亜熱帯の開発途上国、すなわち発酵生産技術レベルの比較的低い地域に立地される可能性がある。著者らは、そのようなことも考慮して、省資源化と高効率化という重要課題を達成する手段は、i) 現在使用されている、もしくは今後使用が予定されている全てのアルコール発酵微生物に適用可能であること、ii) 安価であること、iii) 簡易であること、iv) 普遍的であること、そしてv) 法的規制にかからないことなどの諸条件を満足する必要があると考えた。そのような諸点とショウガ根茎を添加して発酵させると酵母の発酵が促進される⁶⁾という著者らのこれまでの研究結果を考慮し、球根類同様、諸々の生理活性成分などを含む種子類を利用した省資源的高効率発酵技術の開発を意図した。具体的には、酵母などの微生物自身が潜在的に保有している能力を種子類の添加によって最高に発揮させ、以って省資源化と高効率化を実現する発酵技術を開発するものである。

試験に供した種子類はユズ、ブドウ、ビワ、ゴマ、エゴマ、サンショウなどであった。図7はそれらのうち28°C発酵におけるYPD培地でのブドウ種子粉砕物の添加量と酵母の炭酸ガス発生経過の関係を示したものである。図から明らかなように、ブドウ種

子を添加すると、用量依存的に炭酸ガス発生量が増大、すなわち発酵は著しく促進された。とりわけ

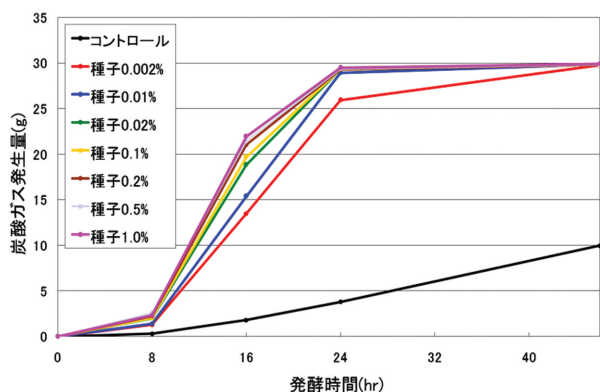


図7 YPD培地におけるブドウ種子添加量と酵母の炭酸ガス発生経過の関係

0.002%という極微量の添加量でも、発酵の初期段階から、コントロールを大きく上回る炭酸ガス発生量が得られたということは注目に値する。このように、ブドウ種子をごく僅か添加しただけで、特別な酵母菌株を使用しなくとも発酵の高効率化を実現できることがわかったことは実用的見地から重要である。なお、その他の種子粉砕物を添加した場合も同様な効果が得られている^(7~11)。また、ザイモナス属及びザイモバクター属のアルコール発酵細菌の場合も酵母の場合と同様な結果が得られている^(11~13)。

アルコール発酵は発熱反応であるため、発酵温度を酵母などの最適温度である28~32℃の範囲に維持するにはモロミを冷却する必要がある。冷却には多量の水とエネルギーが必要であることから、省資源化の観点から発酵温度の高温化、すなわち高温発酵法の実用化が重要な課題の1つとなっている。そこで、28℃発酵で示された種子類の発酵促進効果が36℃、38℃といった高温発酵下でどのようになるの

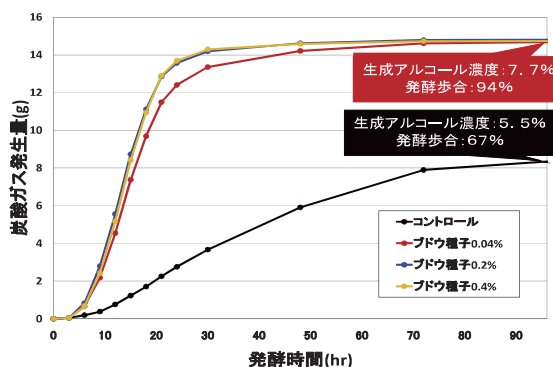


図8 36℃発酵におけるブドウ種子添加量と酵母の炭酸ガス発生経過の関係

か検討した。図8は36℃発酵の場合のブドウ種子添加の影響をみたものである。この場合も、28℃の場合と同様、添加量が多くなるに従って、促進されたが、発酵96時間後の成績は、無添加のコントロールが生成アルコール濃度5.5%、発酵歩合67%に留まったのに対して、添加した場合は、添加量間に差はなく、生成アルコール濃度7.7%、発酵歩合94%の良好な成績が得られた。

図9は38℃の場合について示したものである。図から明らかなように、38℃という高温発酵にもかかわらず、発酵開始20数時間で、コントロールの生成アルコール濃度が約1%であるのに対して、添加量の最も多い0.4%の場合では、約5%ものアルコールを生成しているなど、添加によって発酵は顕著に促進された。ただ、前述の28℃、36℃発酵の場合に比べて発酵速度と発酵成績は低下傾向を示した。これは38℃という高温ストレスに加えて、発酵前期に生成したアルコールのストレスが加わった結果であると考えられる。そうだとすれば、アルコールストレスを解除もしくは低減させてやれば酵母は、発酵の全期間にわたって、比較的高い活性を維持しうる可能性がある。アルコールストレスを解除、低減する方策の1つに減圧発酵がある。その減圧発酵は発酵温度の高い方がより効果的であるのは論を待たない。従って、これらの事実は種子類を利用すれば省資源化の点で期待されている高温発酵法、及び高温減圧発酵法の実用化への道が切り拓かれる可能性を示している。なお、その他の種子類の場合も同様な成績が得られている^(14~16)。

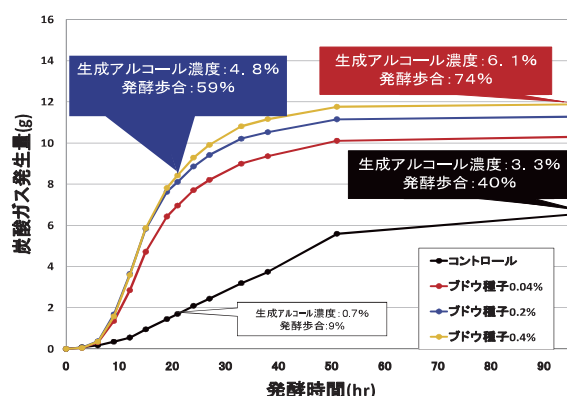


図9 38℃発酵におけるブドウ種子添加量と酵母の炭酸ガス発生経過の関係

以上、ブドウ種子を代表例として種子類の酵母などのアルコール発酵微生物に対する作用特性について研究した結果を述べた。これらの知見が、バイオ

エタノールの省資源的高効率発酵技術の実用化に少しでも寄与すればと思っている。

4. 寒天からのバイオエタノール生産に関する研究

4.1 緒言

海藻は光合成により、多糖類を作り、多糖類は海洋生物の炭素源となる重要な物質である。農林水産省の平成17年のデータによれば、海藻全体の年間生産量は湿潤ベースで約61万トンであり、そのうち養殖が約51万トン、天然が約10万トンである。しかし、年間生産量は平成2年からの統計で徐々に減少傾向にある。平成19年、東京水産振興会の研究委員会はバイオエタノールを海藻から大量に生産する構想を発表し、日本の領海の1から2%を用いることにより、年間1.5億トンの海藻を養殖でき、400から500万kLのバイオエタノールを生産できるという試算を行った。これは現在の国内のガソリン使用量の約1割に相当する。平成22年にはコンブやホンダワラを酵素で液状化し、酵母と細菌を用いて、約2週間で海藻1kgから200mLのバイオエタノールを生産することに東北電力と東北大学の共同研究チームが成功した。このように海藻からのバイオエタノール生産に関する研究は実用化に向けて進んでいる。

コンブの主な多糖はラミナランであり、構成単糖はグルコースである。これに対して、ホンダワラの主な多糖はアルギン酸、ラミナラン、フコイダン等である。これらの構成単糖や糖の間の結合様式が異なるため、それらの多糖を分解するための酵素が異なり、様々な多糖分解細菌が分離されてきた。一方、寒天の主な多糖はアガロースとアガロペクチンであるが、これまでバイオエタノール生産を目的とした寒天の酵素分解について報告例がない。ここでは筆者らのこれまでの寒天分解酵素の研究とバイオエタノール生産への応用の可能性について述べる。

4.2 寒天分解菌と寒天オリゴ糖

紅藻類が生産する多糖類の中でアガロースとアガロペクチンを主成分とする寒天はゲル化剤などとして、食品に利用されているだけでなく、DNAや生体関連物質の分離に使われ、分子生物学には欠くことのできない材料である。

アガロースはガラクトースとアンヒドロガラクトースが $\beta-1,4$ 及び $\alpha-1,3$ 結合で交互に結合した多糖類である(図10)。酵母を使ってバイオエタノールを作らせるためには、寒天を構成単糖にまで分解する必要がある。寒天を完全に単糖にまで分解する

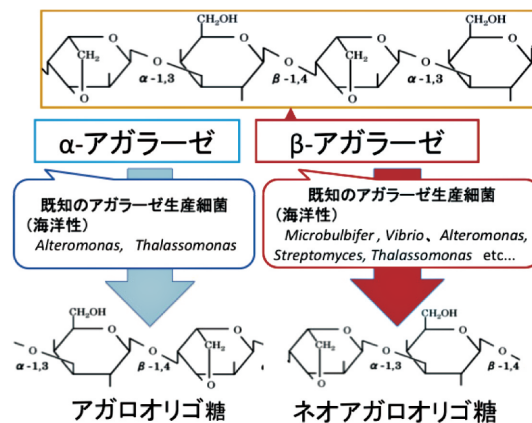


図10 アガロースの分子構造とアガラーゼ活性

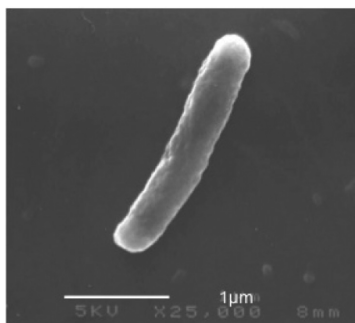
過程では寒天オリゴ糖が生産され、如何に効率よく寒天オリゴ糖を生産するかがバイオエタノール生産の鍵となる。

最も簡単に寒天オリゴ糖を得る方法の1つは酸加水分解であり、この場合、グリコシド結合がランダムに切断され、種々のオリゴ糖が得られる。より温和で省エネルギー的手法の1つは寒天分解酵素を使う方法である。

寒天を唯一の炭素源として生育できる微生物は寒天を分解する酵素を生産し、その多くが海洋環境から単離されてきた。そのほとんどは細菌であり、*Pseudomonas*⁽¹⁷⁾、*Vibrio*⁽¹⁸⁾、*Streptomyces*⁽¹⁹⁾、*Pseudoalteromonas*⁽²⁰⁾、*Agarivorans*⁽²¹⁾、*Microbulbifer*⁽²²⁾細菌などが知られている。ウニや軟体動物など海藻を食べる生物は寒天分解細菌を共生系として持っていることがある。寒天分解細菌はアガロースの $\beta-1,4$ 及び $\alpha-1,3$ 結合を切断する β -アガラーゼ及び α -アガラーゼを生産するため、この酵素を使うことによって寒天オリゴ糖を効率的に生産することが可能となる。

これまでに単離精製され、クローニングされた寒天分解酵素のほとんどは β -アガラーゼである。これまでに知られる β -アガラーゼの多くはエンド型酵素であり、アガロースの主な加水分解産物として、ネオアガロビオースとネオアガロテトラオース混合物(ただし、少量のネオアガロヘキサオースを含む)を生産するタイプか、ネオアガロテトラオースとネオヘキサオース混合物(ただし、少量のネオネオアガロビオースを含む)を生産するタイプである。ネオアガロビオースのみを生産するエキソ型の β -アガラーゼについても僅かに報告されている。また、ネオアガロオクタオースやネオアガロデカオースを生産する酵素についても1報⁽²³⁾報告されているが、

エンド型の酵素の場合、分解の初期にはこれらの鎖長の長いネオアガロオリゴ糖も生産される。



Cellvibrio sp. 推定
(株式会社 NCIMB JAPAN 依頼)

図11 *Cellvibrio* sp.の電子顕微鏡写真

これら海洋性細菌由来の寒天分解酵素については多数報告されているが、非海洋性の寒天分解細菌に関する研究報告⁽²⁴⁾は極めて少ない。筆者らは活性汚泥から寒天分解菌を単離し、遺伝子解析、形態学的解析などから *Cellvibrio* sp. (図11) と同定した。この微生物から寒天分解遺伝子 *agaA* 及び *agaB* を大腸菌にクローニングする事に成功した。また、アガロースの分解産物を質量分析 (図12) 及び核磁気共鳴分析を行い、これらの寒天分解酵素がβ-アガラゼ遺伝子であることを確認した。薄層クロマトグラフ及び高速液体クロマトグラフ (図13) を用いて分析したところ、*AgaA* はアガロースをネオアガロピオースとネオアガロテトラオース (ただし、少量のネオアガロヘキサオースを含む) に分解し、*AgaB* はアガロースをネオアガロテトラオースとネオアガ

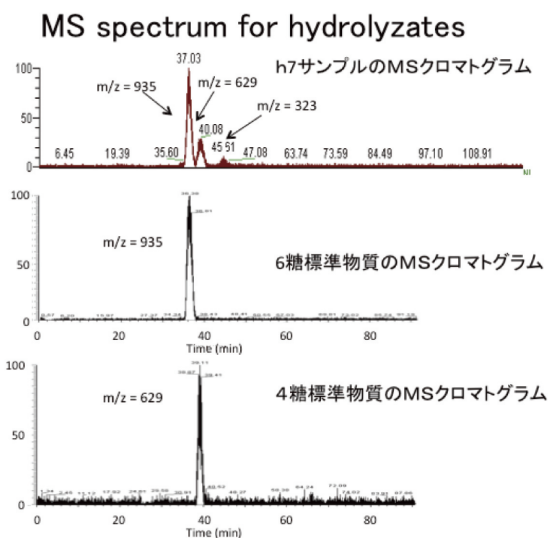


図12 寒天分解産物のマスペクトル

ロヘキサオース (ただし、少量のネオアガロピオースを含む) に分解することが分かった。これは市販の *Pseudomonas atlantica* 由来のアガラーゼと同じであった。筆者らの *AgaB* を SignalP server 等で調べたところ、シグナル配列を持っていることが明らかとなり、*agaB* 遺伝子を *Bacillus*, *Brevibacillus* に遺伝子組み換えしたところ、大腸菌では組み換え酵素が培地にほとんど分泌されなかったのに対して、

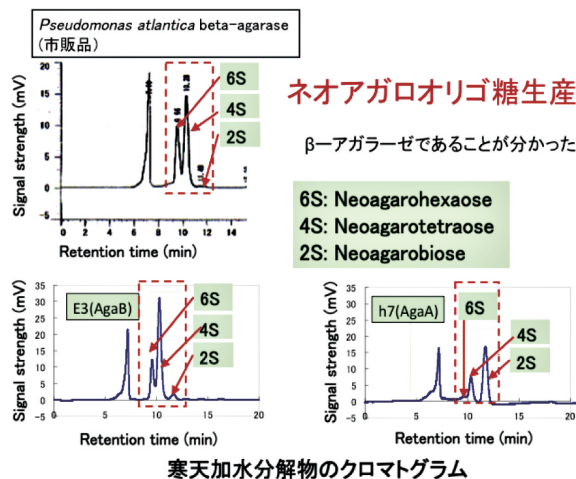


図13 寒天分解産物のHPLCクロマトグラム

酵素タンパク質の90%以上が菌体外に分泌され、寒天を培地に添加することによって、菌体を破壊することなく、寒天オリゴ糖の生産ができることが分かった (図14)。これに対して、*AgaA* にはシグナル配列は見られなかった。

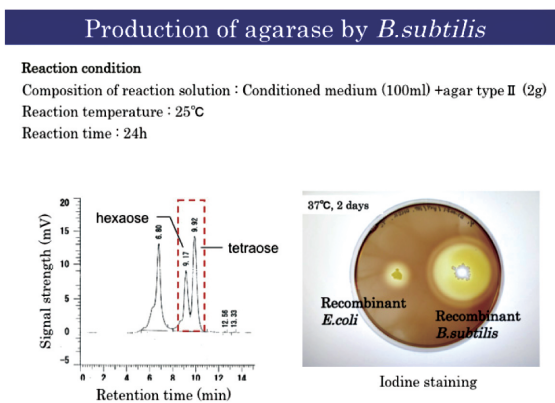


図14 遺伝子組み換え枯草菌のプレート写真と寒天分解産物のHPLCクロマトグラム

バイオエタノール生産のためにはネオアガロピオースを生産した後、さらにα-アガラゼで分解する必要があるが、*AgaA* を使うことにより、ネオアガ

ロビオースを生産できるが、ネオアガロテトラオースも同時に生産されるため、ネオアガロテトラオースをさらに分解する寒天分解酵素遺伝子の探索も今後必要であると思われる。

4.3 α -アガラーゼの探索

α -アガラーゼに関する研究は *Alteromonas*⁽²⁵⁾、*Thalassomonas*⁽²⁶⁾、*Bacillus*⁽²⁷⁾ 属細菌など数株に限られ、ほとんど研究されていない。筆者らは、寒天分解菌の菌体破壊液から陰イオン交換クロマト及びゲルろ過クロマトを用いて、 α -アガラーゼの精製

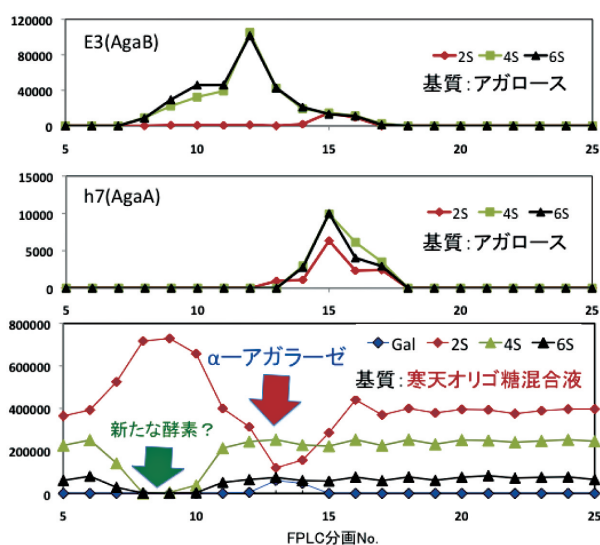


図15 FPLCによる酵素の精製

を行い、種々の特性を調べた (図15)。本菌の α -アガラーゼはネオアガロピオースをガラクトースとアンヒドロガラクトースに分解するとともに、ネオアガロテトラオースとネオアガロヘキサオースを非還元末端側からアンヒドロガラクトースを切断し、それぞれ三糖、五糖にすることが分かった。現在、 α -アガラーゼ遺伝子のクローニングを検討中である。

4.4 最後に—寒天からのバイオエタノール生産の可能性

これまでの研究で完全とは言えないが寒天を単糖にまで分解するための酵素遺伝子はほぼ得られた。これらの遺伝子を用いて酵母によるバイオエタノール生産を行おうとする場合、いくつかの方法が考えられる。寒天を分解する最初のプロセスとして、 β -アガラーゼを菌体外酵素として分泌する方法や β -アガラーゼを表層提示し、寒天分解を行う方法が考

えられる。酵母細胞内に寒天オリゴ糖が容易に取り込まれるかどうか現時点では分からないが、菌体内酵素として α -アガラーゼを発現する酵母を育種することでバイオエタノール生産が可能になると思われる。また、アンヒドロガラクトースに関する研究は全くなく、酵母にどのように作用するか検討の必要があるだろう。

5. 木質バイオマスビジネス創造と産業政策の研究

5.1 木質バイオマス事業の課題背景と研究経緯

地方におけるビジネス或いは産業創造は、我が国における重要な課題の1つである。少子高齢化、過疎化、社会経済の停滞を克服するためには、地域活性化に学として資するような調査分析検討が望まれており、東日本大震災の復興にも資すると考える。高知工科大学と地方自治体と企業が中心となって取り組んでいる木質バイオマスエネルギー事業プロジェクトでは、事業立ち上げ段階からモニタリングを行っている。地方における事業の成功事例は概して規模が小さく産業クラスターもステイルホルダーの数が少ない場合が多いのは何故なのか、その産業クラスターが安定しない場合が多いのは何故なのか、これらの疑問に対する明快で論理的な回答は無い。

従来のビジネス戦略論では、ヒト・モノ・カネといった経営資源が比較的豊富で自発的な産業形成の望める大規模経済圏をベースとした企業経営環境における戦略論の展開が主流であり、これらの経営資源が希薄で尚且つ産業基盤の弱い高知県のような地方における地域ビジネスの経営環境上の課題を考慮した戦略的方法論については確立されていないからである。

これまでは、高知工科大学が地域の企業、農家らと共に取り組んできた木質バイオマスエネルギービジネスについて、そのプロセス研究を行うことでどのような事業形成に関わる阻害要因があるかについて検討してきた。本稿では、他の地方ビジネスの事例を取り上げ、地域ビジネス形成の実践を通じ得られた経験をもとに、地方における地域ビジネス及び地域産業戦略論についての考察を行う。

5.2 研究方法論

地方のビジネスの安定性要件を整理するために中核事例として取り上げる木質バイオマスエネルギー事業プロジェクトについて、現象や経過を詳細に検証しながら記述する。次にこの中核事例をもとに他の地域ビジネス事例との比較検討を行った。具体的

には、徳島県上勝町における(株)いろどりの葉っぱビジネス、高知県馬路村のゆずビジネス、沖縄県石垣島において取組まれた島野菜販売プロジェクトなどである。これらの比較検討を通じて、地域ビジネスの事業創造プロセスそのものおよびプロセスにおけるリスクを検証する。最後に、いかにすればクラスターが安定して創造して作用するかについて、他の地域ビジネス事業との比較検討を通じて考察する。

次に、マイケル・ポーターの中心的理論から5要因論、3つの競争戦略、クラスター戦略を取り上げ、経営資源の乏しい地方における企業戦略および地方の産業政策的観点より高知県における木質バイオマスエネルギービジネスの事例における競争戦略要因についてポーター理論をもとに解説を加えていくことで、新技術を用いた地方における新たな産業創造の戦略について考察を行う。

5.3 産業クラスター分析による成果

調査研究事例におけるビジネスの主体は、意欲ある農家、企業の技術開発や事業形成者、大学の研究者であった。ステークホルダーは非常に複雑かつ多岐にわたり、産業クラスターも複雑である。クラスターの複雑さがクラスターの不安定化と密接な関係がある。クラスターが複雑になれば、クラスターが不安定になり、事業が成功する確率が下がり、ビジネスの成功まで長期間を要する。事業には様々なリスクが伴う。クラスターの複雑さとビジネスのリスクを詳細に検討することが重要である。上勝町のように比較的成功まで時間がかからなかった事例もあれば、馬路村のように十数年かかるものもある。馬路村のゆずビジネスは20年の期間を経て成功した。地域ビジネスの特徴の1つとして、成功する確率よりも失敗する確率が高い。失敗は語られず分析されないのが通常であり、蓄積を基礎とした研究体系を形成することが難しい。ビジネスモデルは単なる到達点であって、そこに至るプロセスモデルが重要である。木質バイオマス事業の様に、関連産業が多様な場合には、事業の安定化のための産業クラスターが必要である。また、一企業の利害を超える産業クラスターの安定化を検討する必要があり、組織間安定性、相互利益安定性、規模による安定性が必要である。

全国的に木質バイオマスプロジェクトは取組まれているがいずれも苦戦している。本調査研究においては、どの様なビジネス特性や経営環境がビジネスを困難にさせているのかについても分析検討した。今後も様々なプロセスデータを得ながら、これまで

の様々なデータとの詳細な分析を行い、論理構築に取り組みたいと考えている。現実の課題解決は学術分野の統合無くしては成立しない点、および研究活動がある分野を対象としている場合には、常に全体との関係を意識した課題解決の方法論を意識すべきであるという点の2つの学術的視点の重要性を重視する必要があると考えている。地域におけるビジネスの事業形や地域活性化に関わる研究は、具体的な事業を対象として具体的な効果を求められる。しかしながら、実践していること自体に意義があるかの様な取り組みが多いのも事実である。今後の地域活性化に関する調査研究は、具体的なビジネスの形成プロセスを研究対象として分析研究を行い、疑似的にビジネスの形成プロセスを体験し、その上で様々な失敗事例を比較分析することが望まれると、我々は考えている。プロセス研究を行うことが、ビジネスの現場を中心とした事業創造や地域活性化を研究する研究者を育てるのではないだろうか^(28~29)。

5.4 地方の経営戦略に関する考察

ポーター理論は成熟した市場を前提としており、新規参入事業者や代替品、あるいはサプライヤーやバイヤーに対する既存事業者としての市場戦略を中心に語られている。これに対し、高知県内の民間企業によるバイオマスボイラビジネス戦略は、市場がほぼ存在していない状況における戦略を考える必要がある。この場合、仮に既存市場を重油ボイラー市場であるとするれば、ポーター理論においてはバイオマスボイラは新規参入あるいは代替品であり、ポーター理論とは逆の立場から既存事業及び地域外の新規参入事業者や代替品に勝つための戦略について考察することになる。

ポーター理論では既存事業者の新規参入業者に対する競争戦略要因のひとつとして、参入に際して巨額の投資を必要とする状況(参入障壁)をつくりあげてあげているが、地方の中小企業による新規参入のケースにおいては、これを地方の一中小企業で吸収することは非常に困難である。そのため行政による補助などの公的支援が参入には必要不可欠となるが、これは規模の経済が働く市場への参入戦略についても同様のことがいえる。地方において競争力を持たない小規模事業者が乱立する状態は、地方における強靱な産業クラスター構築を目指す産業政策のうえで最も望ましくない状況である。つまり、産業基盤の希薄な地方で新たな産業クラスターを構築しこれを安定させるためには、少なくとも市場形成段階に産業政策として補助や市場制約等の行政に

よる支援が欠かせない。このように地方という経営環境において新たな市場構築を行ううえで行政の果たす役割は非常に大きいのであるが、地域に一定規模以上の経済波及効果をもたらす投資効果の高い事業案件への集中投資は、投資規模・リスクも大きくなることから、行政がリスクをとることに非常に慎重となることが多い。また地域内の既存事業者からの反発を恐れ、公平平等の原則により地元の一企業を支援することを避けることも地方における経営環境下では少なくないことはポーター理論では語られていない。

地方におけるビジネス或いは産業創造を考える場合、ポーター理論において更に修正すべき点は、競争優位性の評価指標である。売り手と買い手の市場における競争では価格などと同様に信頼性も重要である。特にバイオマスボイラのような新規参入あるいは代替品の参入に際しては、商品の信頼性のバイヤーからの評価が重要になる。バイオマスボイラの場合、特にその商品そのものの信頼性ととも燃焼に必要な木質ペレットの価格および量の長期的な安定供給に対する信頼性も重要な要素となっており、価格等との合成指標を設定して競争性を評価する方法論が必要である。

本研究では研究者自身が時にプレーヤーとなり、地方における産業クラスター構築を目指したビジネスを動的に観察し、地方ビジネスの実態と既往の経営戦略理論と照らし合わせることで、地方でのビジネス及び産業政策に関する戦略について考察を行ったが、本研究をもとに、地方における経営戦略論として一般化し、地域活性化ビジネスおよび産業政策の活動現場で役立つ戦略的方法論を確立することが今後の研究課題である^(30~32)。

謝辞

太陽電池、種子類を利用したバイオエタノール生産、寒天からのバイオエタノール生産の研究は、それぞれ角研究室、松元研究室、有賀研究室に所属した大学院生及び卒業研究生との共同研究に基づくものである。ご協力頂いた諸氏に感謝する。

文献

- (1) 榎本他、“環境技術開発を基盤とした持続可能な環境経営システムの構築に向けて 第4報”、高知工科大学紀要、Vol.8、No.1、pp.73-79、2011年7月。
- (2) 松尾 豊 “有機薄膜太陽電池の科学”、化学同人、2011年。

- (3) Graetzel, M., J. Chem. Sci., Vol.107, pp.607-619, 1995.
- (4) 住友化学の開発した材料を使用して、UCLAのYang教授が作製した有機薄膜太陽電池の効率が10.6%であると米国国立再生可能エネルギー研究所(NREL)において認定された。<http://www.sumitomo-chem.co.jp/news-releases/docs/20120214.pdf>
- (5) H. Ozawa, R. Shimizu and H. Arakawa, RSC Adv., Vol.2, pp.3198-3200, 2012.
- (6) 池内慧士郎、合田智晶、大房 明、松元信也、“微生物に対するショウガの作用とその応用 (1) 酵母の増殖発酵特性に及ぼすショウガの作用”、日本農芸化学会中四国支部第16回講演会講演要旨集、p.37、2006年。
- (7) 木下絢賀、坂東裕也、山本達也、高橋 永、上田明代、松元信也、“酵母の発酵特性に対するユズ種子の作用”、日本農芸化学会中四国支部第26回講演会講演要旨集、p.25、2010年。
- (8) 喜田和亨、小林和馬、梶原秀一、高橋 永、松元信也、“酵母の発酵特性に対するビワ及びブドウ種子の作用”、日本農芸化学会中四国支部第26回講演会講演要旨集、p.26、2010年。
- (9) 西澤和展、松元信也、“微生物の発酵特性に対するエゴマ種子の作用”、日本農芸化学会中四国支部第29回講演会講演要旨集、p.32、2011年。
- (10) 藤原 誠、高橋 永、松元信也、“酵母の発酵特性に対するサンショウの作用”、日本農芸化学会中四国支部第29回講演会講演要旨集、p.32、2011年。
- (11) 松元信也、高橋 永、木下絢賀、水間 寛、坂口 周、“アルコール発酵方法及びアルコール”、特願2009-284271、2009年。
- (12) 松元信也、藤原 誠、“アルコール発酵方法及びアルコール”、特願2010-279836、2010年。
- (13) 松元信也、西澤和展、“アルコール発酵方法及びアルコール”、特願2010-279838、2010年。
- (14) 松元信也、高橋 永、喜田和亨、梶原秀一、曾根隆志、山本達也、“アルコール発酵方法及びアルコール”、特願2009-284270、2009年。
- (15) 松元信也、藤原 誠、“アルコール発酵方法及びアルコール”、特願2010-279837、2010年。
- (16) 松元信也、西澤和展、“アルコール発酵方法及びアルコール”、特願2010-279839、2010年。
- (17) L. M. Morrice, M. W. McLean, W. F. Long and F. B. Williamson, Eur. J.

- Biochem., Vol.137, pp.149-154, 1983.
- (18) Y. Sugano, T. Matsumoto, H. Kodama and M. Noma, *Appl. Environ. Microbiol.*, Vol.59, pp.3750-3756, 1993.
- (19) M. J. Buttner, I. M. Fearnley, M. J. Bibb, *Mol. Gen. Genet.*, Vol. 209, pp.101-109, 1987.
- (20) Y. H. Oh, C. Jung and J. Lee, *J. Microbiol. Biotechnol.*, Vol. 21, pp.818-821, 2011.
- (21) D. G. Lee, M. K. Jang, O. H. Lee, N. Y. Kim, S. A. Ju and S. H. Lee, *Biotechnol. Lett.*, Vol.30, pp.911-918, 2008.
- (22) Y. Ohta, Y. Hatada, Y. Nogi, Z. Li, S. Ito and K. Horikoshi, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, Vol.66, pp.266-275, 2004.
- (23) C. Ma, X. Lu, C. Shi, J. Li, Y. Gu, Y. Ma, Y. Chu, F. Han, Q. Gong and W. Yu, *J. Biol. Chem.*, Vol.282, pp.3747-3754, 2007.
- (24) A. Hosoda, M. Sakai and S. Kanazawa, *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, Vol. 67, pp.1048-1055, 2003.
- (25) I. Hassairi, B. R. Amar, M. Nonus and B. B. Gupta, *Bioresour. Technol.*, Vol.79, pp.47-51, 2001.
- (26) Y. Ohta, Y. Hatada, M. Miyazaki, Y. Nogi, S. Ito and K. Horikoshi, *Curr. Microbiol.*, Vol.50, pp.212-216, 2005.
- (27) H. Suzuki, Y. Sawai, T. Suzuki and K. Kawai, *J. Biosci. Bioeng.*, Vol.93, pp.456-463, 2002.
- (28) 那須清吾、桂信太郎、永野正朗、“地方のための経営学”、高知工科大学社会マネジメント研究所、2011年。
- (29) 那須清吾、“森林資源のエネルギー化技術による地方の自立・持続可能な地域経営システムの構築”、研究開発実施終了報告書、2011年。
- (30) 桂信太郎、永野正朗、那須清吾、“地域ビジネスの現場から学ぶ「地方のための経営学試論」”、四銀経営情報、2011年。
- (31) M. E. Porter、“競争の戦略”、ダイヤモンド社、1995年。
- (32) M. E. Porter、“競争戦略論Ⅱ”、ダイヤモンド社、1999年。

Construction of a sustainable environmental management system based on the development of environmental technologies

The fifth report

Keiichi Enomoto¹, Katsuhiko Sumi², Nobuya Matsumoto³, Osamu Ariga⁴,
Shintaro Katsura⁵, Masao Nagano⁶, Seigo Nasu⁷, Takeshi Ohama⁸,
Sakae Horisawa⁹, Yoshio Morozumi¹⁰, Yoshio Inoue¹¹,
Osamu Tomisawa¹², Makoto Hirano¹³,
Shunji Kusayanagi¹⁴, Yasushi Mabuchi¹⁵

(Received: May 9th, 2012)

Graduate School of Engineering
Kochi University of Technology
185, Tosa-yamada Miyanokuchi, Kami, Kochi JAPAN

E-mail: ¹enomoto.keiichi@kochi-tech.ac.jp,

²sumi.katsuhiko@kochi-tech.ac.jp, ³matsumoto.nobuya@kochi-tech.ac.jp,

⁴ariga.osamu@kochi-tech.ac.jp, ⁵katsura.shintaro@kochi-tech.ac.jp,

⁶nagano.masao@kochi-tech.ac.jp, ⁷nasu.seigo@kochi-tech.ac.jp,

⁸ohama.takeshi@kochi-tech.ac.jp, ⁹horisawa.sakae@kochi-tech.ac.jp,

¹⁰morozumi.yoshio@kochi-tech.ac.jp, ¹¹inoue.yoshio@kochi-tech.ac.jp,

¹²tomisawa.osamu@kochi-tech.ac.jp, ¹³hirano.makoto@kochi-tech.ac.jp,

¹⁴kusayanagi.shunji@kochi-tech.ac.jp, ¹⁵mabuchi.yasushi@kochi-tech.ac.jp

Abstract: Energy production from sunlight and biomass is a core technology for the utilization of natural and renewable energy resources. Although dye-sensitized solar cell is a low-cost device, further increase of photoelectric conversion efficiency is required. Effect of multilayered dye on the conversion efficiency was examined. For the industrial production of bioethanol, high efficiency alcoholic fermentation is indispensable. It was found that fermentation rate and the final alcoholic concentration were remarkably increased by the addition of crushed seeds of grapes and other plants. Furthermore, possibility of bioethanol production from seaweed is discussed based on the technological development of agar-degrading enzymes used for bioethanol production. We also discuss a strategy for the creation of new industries in local areas, dealing with a biomass industry as a model case.