

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

榎本恵一* 那須清吾 富澤 治 松元信也 井上喜雄
大濱 武 角 克宏 有賀 修 堀澤 栄 両角仁夫
平野 真 草柳俊二 馬淵 泰

高知工科大学 工学部 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: *enomoto.keiichi@kochi-tech.ac.jp

要約：高知工科大学が開発した環境技術を基盤とする「環境技術開発・経営システムセンター」が設立された。センター設立の目的は地域の持続的な環境経営システムモデルの構築である。本センターでは、環境技術と環境経営を核とした研究が行われている。環境経営システムの研究においては、環境技術を評価し、地域社会の経営の要素として組み入れる。環境技術としてバイオマスを用いたエネルギー開発、太陽電池と燃料燃焼の効率化、バクテリアによる有機廃液を用いた有用物質の生産の研究が進行中である。センターでの研究を基に、地域における環境目標を設定し、MOT(技術経営)の手法を用いて環境経営システムを構築することを目指す。

1. はじめに

我が国における環境問題は環境汚染から始まった。すなわち公害である。その歴史は古く、明治時代の足尾銅山鉱毒事件や戦後の経済成長に伴う四大公害病(水俣病、新潟水俣病、イタイイタイ病、四日市喘息)に代表される水汚染と大気汚染に人々は苦しんできたのである。我が国ではこれらの公害は懸命の努力によってほぼ克服されたが、経済成長の著しい新興開発途上国ではこれらの公害はむしろ広がりを見せている。

一方、我が国が現在直面している環境問題は古典的公害とは質的に異なっている。公害は加害者と被害者の構図が明確であり、その影響は局地的であったのに対し、我々の直面する環境問題においては加害者と被害者の区別は容易ではなく、またその影響は一地方や国内に止まらず、世界全体に及んでいる。

我々が立ち向かおうとしている環境問題が出現した背景には、百年前にはほぼ無限と思われてきた地球の包容力や許容力の限界が誰の目にも明らかになってきたことがある。その具体的な表れが二酸化炭素濃度の増加と地球温暖化であり、大規模な農業や都市

化による水の不足、砂漠化などである。今、我々はこれらの環境問題に立ち向かうべく、その戦略を早急に構築すべきときに来ている。

一方、環境の再生や保全に関する個々の技術についての記述は数多く見られるが、それが直ちに環境問題の解決につながるわけではない。これらの技術が真に社会に受け入れられ、環境問題の解決や良好な環境の維持に貢献するには、技術を評価し、地域社会の経営の要素として組み入れ、稼働させてゆく仕組みが必要とされる。これには個々の技術をもつ事業者以外に行政や市民など地域社会全体が参加し、さらに参加者の負担と便益の調整を図ることが必要である。この地域社会全体として良好な環境を持続させてゆく仕組みをここでは「環境経営システム」と呼ぶが、このシステムのあり方とその手法についての詳細な研究は今までにほとんどなく、未開拓の分野であると言える。本稿で述べる研究は、高知県とその周辺を対象として、環境技術開発を環境経営システムの中に位置づけ、今後の持続可能な環境を維持する地域社会システム構築のモデルとしようとする試みである。

2. 環境技術開発・経営システムセンターの立ち上げ

高知工科大学では、大学院社会システム工学コースを中心として地域社会の発展に資する社会システムの研究が活発に行われてきた。また、起業家コースでは、技術と経営について主に技術者を対象とした教育を行い、その結果数多くの大学発のベンチャー企業を創出するに至っている。一方、物質・環境システムコースでは、環境負荷を低減できる材料の開発、木材等バイオマスの利用、微生物利用技術などの基盤技術が蓄積されており、森林資源や海洋深層水の利用、環境計測などの研究を通じて高知県地域との密接な関係を保っている。知能機械システムコースでは機械装置とその制御システムに豊富な経験を有している。このように本研究で実施しようとする地域の環境の改善と保全を目的とした環境経営システムの構築にとって、個々の要素技術と経営システム構築の手法はすでに大学内に存在する。そこでこれらの技術と経営のポテンシャルを融合することにより、環境技術開発を基盤とした、物質的、経済的、社会的に持続可能な環境経営システムが構築できると考え、平成19年度私立大学学術フロンティア推進事業の推進母体としての「環境技術開発・経営システムセンター」が立ち上げられた。この研究プロジェクトはプロジェクト1（環境技術開発）とプロジェクト2（環境経営システムの構築）の二つのサブプロジェクトに分けられているが、2つのサブプロジェクトメンバーが一同に会する会合で互いの意思疎通を図りながら、5年間の予定で事業を推進する予定である。平成19年度は主に環境技術シーズの現状と可能性について分析し、次年度より、経営目標と要素技術に関連づける研究開発ロジックモデルを設定し、その修正を加えながら、最終的に地域環境経営モデルを構築することとする。

3. 環境技術シーズ

本研究プロジェクトを担う環境技術は、バイオマスを原料とした新規エネルギー開発、太陽電池と重油燃焼ボイラーの高効率化、バクテリアによる有用物質生産に大別される。その研究内容を次に述べる。

3.1 バイオマスをを用いたエネルギー開発

- バイオエタノールの省資源的高効率生産技術の開発（松元信也、井上喜雄）

【目的】地域資源を総合的に利用した省資源の高効

率バイオエタノール生産システムを開発する。

【現状】世界のバイオエタノールの生産量は、ここ数年急激に増大し、2006年度は5年前の1.6倍に相当する約5000万klに達した。¹⁾この傾向は、地球温暖化対策とも関連して、今後も続くものと予測されている。現時点における主な原料は、当該国の主要農産物であり、かつ食料と競合するトウモロコシとサトウキビであるが、非食料の農林産物からの製造技術の開発も、世界的規模で活発に行なわれている。それにもかかわらず、我国をはじめとする多くの国において、バイオエタノールの普遍の実用化はあまり進んでいないのが実情である。その最大の原因はコスト高やエネルギー収支の低さである。

高知県は、コメ、柑橘類、根菜類、花卉類、木材など日本でも有数の産地である。これら農林産物もしくはその生産現場や加工工程さらには家庭などからの排出物は、量的、質的問題はともかく、いずれもバイオエタノールの原料となりうるものである。

本研究では、開発を意図している地域資源を総合的に利用したバイオエタノール生産システムの主要プロセスの一つである、醗酵プロセスの開発に注力する。具体的には、我々が提唱している、異なる特性を有する複数の微生物を用いる微生物併用醗酵システム（図1）の基本的な運転操作条件の設定に必要なデータを収集する。これまでに、幾つかの地域特有の農産廃棄物などの原料特性を評価し、バイオエタノール製造への利用の可能性を明らかにしている。今後、更に多種多様な地域バイオマスの原料としての評価をはじめ、微生物、環境因子など多面的な検討を実施し、バイオエタノールの普遍の実用化の醗酵技術的障壁となっている醗酵の高速化、高温化、高収率化、高濃度化などに関する基礎的なデータを収集、評価解析する。

【目標】地域バイオマスを原料とする、スケールアップ及び実用化を指向した微生物併用醗酵システムの基本操作条件を設定すると共に、地域資源を総合的に利用した省資源的高効率バイオエタノール生産システム構想の特徴と課題を提示する。

- 白色腐朽菌を利用した木材中のリグニンの分解（堀澤 栄）

【目的】木材を栄養源とする担子菌（キノコ類）の一種であるカワラタケなどの白色腐朽菌（図2）は、木材中の化学成分のリグニンを分解する酵素を生産できる。

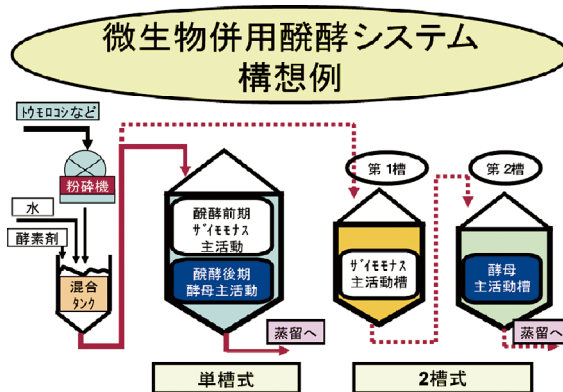


図1 微生物併用発酵システム構想例



図2 大学構内で採取された白色腐朽菌

リグニン分解酵素はラジカルを生成することでリグニンを低分子化し、これによって生成する多様な芳香族化合物を分解できる。白色腐朽菌のもつリグニン分解能を利用して、(1)難分解性化合物の分解処理システムおよび(2)リグニンを含む植物資源の生物変換技術(木材からのセルロースの回収)を開発する。(2)の技術は木質系バイオマスを利用するバイオエタノールの生産にも利用できる。

【現状】白色腐朽菌のリグニン分解能を利用する研究は古くはパルプ製造におけるバイオパルピング、バイオブリーチング技術の開発として注目され、難分解性化合物の分解処理や環境浄化、そして近年は化石資源の代替として生物資源を利用する観点で研究が進められている。しかしながら実用化に結びつかない原因は、担子菌に関する基礎研究の蓄積が多くないこと、生物処

理に担子菌を利用するには増殖速度が遅いこと、実用規模での処理方法が開発されていないことがあげられる。

本研究では、高知県産の高温性白色腐朽菌に注目し、リグニン分解能の高い株をスクリーニングすることにより利用可能な担子菌株の取得を目的とする。また、近年著しく発展している分子生物学的手法を用い、白色腐朽菌の改変を試みる。その一方で、担持体を用いた菌の培養による実用規模の処理方法を検討する。

【目標】

(1) 白色腐朽菌を利用した環境浄化

担体とともに培養した菌体を利用して環境浄化するシステムのモデルを提示する。

(2) 白色腐朽菌を利用する植物資源の生物変換

白色腐朽菌を用いて木材を前処理することにより、リ

グニン分解(セルロース回収)をどの程度効率化できるか評価し、コスト算出への基礎情報を整備する。また一方で、より分解力の高い菌のスクリーニングおよび菌株の改変を試みる。

●バイオマスとしての利用を目指した藻類の分子育種(大濱 武)

【目的】微細藻類が作り出す炭化水素(油)、水素などをバイオマスとして利用するため、分子育種により藻類の生産性を向上させる。

【現状】微細藻類の作りだすバイオマスの利用は低炭素社会の実現に向けて極めて重要である。そのバイオマスとしては、炭化水素(油)、水素、酸素、多糖などがある。特定の条件下で水素を発生させる事ができる微細藻類として、単細胞緑藻のクラミドモナス(*Chlamydomonas reinhardtii*)がある。²⁾また、この緑藻を嫌気条件下で培養すれば、発酵作用により、光合成で蓄積した多糖からアルコールや乳酸が生産される事が知られている。好気条件下における光合成による多糖の蓄積と、嫌気条件下における発酵を繰り返せば、連続的なアルコールや乳酸の生産が可能である。さらに、単細胞緑藻の *Botryococcus braunii* は石油相当の炭化水素類を生産する事が古くから知られている(図3)。³⁾しかしながら、クラミドモナスや *Botryococcus braunii* が生産する有用物質は、その生産効率が極めて悪いために実用化の目処がたっていない。この事を踏まえて、本研究ではこれらの藻類の分子育種による生産性向上を目指す。

【目標】生産コスト的に化石燃料の代替として使用可能なまでに生産性を向上させた種の作出を目標とする。

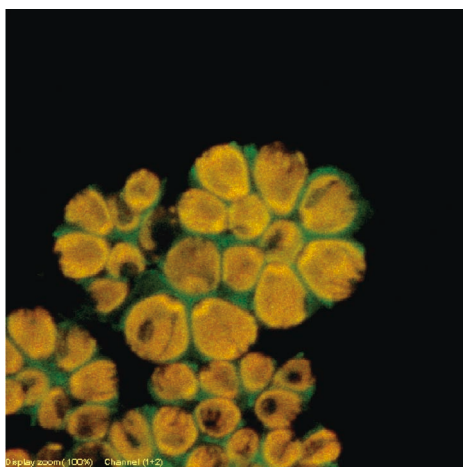


図3 ナイルレッド染色によって示された *Botryococcus braunii* における炭化水素の蓄積状態(緑色が炭化水素の蓄積場所、黄色は葉緑体の自家蛍光を示す)

3.2 太陽電池と重油燃焼の効率化

●多層膜型色素増感太陽電池の開発(角 克宏)

【目的】次世代型太陽電池として知られる色素増感太陽電池に関して色素分子の多層膜化を行い、エネルギー変換効率の増加をねらう。

【現状】エネルギー問題と二酸化炭素による地球温暖化問題はいずれも石油・石炭等の化石燃料の使用により引き起こされており、太陽電池はその問題解決の技術の一つとして期待されている。しかし、現在最も普及しているシリコン太陽電池は製造価格が非常に高いため、一般家庭への普及もしにくく、また製造段階での初期投資のエネルギーも大きく、二酸化炭素排出量も高いと考えられる。太陽光を吸収する色素(図4)を利用する色素増感太陽電池はその製造価格がシリコン太陽電池の1/10程度と考えられ、上記の問題は少なくなっている。しかし、エネルギー変換効率を比較すると、多結晶型シリコン太陽電池が15%と比較的高いのに対して、色素増感型太陽電池は8-10%と低い。従って、色素増感太陽電池のエネルギー変換効率の増加が望まれている。

【目標】色素増感太陽電池における光電流はガラス電極上の多孔性酸化チタン膜と光吸収した吸着色素の間の電子移動反応により引き起こされる。この反応効率が太陽電池の効率に大きな影響を与える。本研究ではポルフィリン亜鉛錯体を吸着色素とし、色素の多層化を行う。今後、より変換効率の高い色素の多層膜化を測ることにより、エネルギー変換効率の大きい太陽電池の作製を目指す。

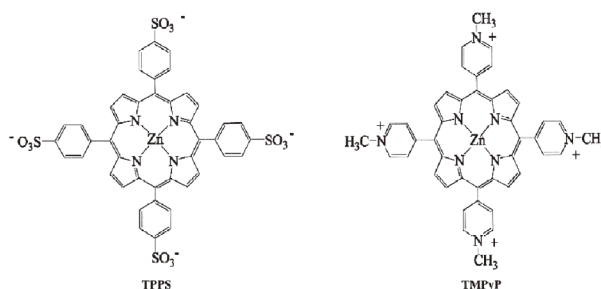


図4 太陽電池増感用色素

●クリーンかつ省エネルギー的な燃料利用プロセスシミュレータの構築(両角仁夫)

【目的】重油に水と少量の乳化剤を混合した乳化燃料の燃焼特性および反応機構を明らかにする。さらに、乳化燃料の燃焼シミュレータを開発し、最適燃焼条件を明らかにすることを目的とする。

【現状】現在、化石燃料資源の枯渇や燃焼に伴い発生するCO₂による地球温暖化などといった問題から、バイオマスや自然エネルギーなどの新エネルギーの利用が

推進されている。しかしながら、エネルギーコストや生産量の問題から、新エネルギーの実用化は十分に進んでおらず、2005 年度における国内一次供給エネルギーのうち、新エネルギーの占める割合は約 3%程度にしかすぎない。そのため、新エネルギーへの転換を一層推進するとともに、化石燃料を使用している既存の燃焼装置の高効率化ならびに石炭や重油など低品位燃料への転換が望まれている。特に、各種工場や施設などで熱源や蒸気発生源として広く普及している小型・中型ボイラーにおいては、燃料として重油の利用が進められているが、近年の原油の急騰により、重油を使用している既設のボイラーにおける燃料使用量の削減は急務な課題である。

重油使用量を削減するための手段の一つとして、乳化燃料の使用が挙げられる。乳化燃料とは燃料油に水と少量の乳化剤を加えて混合したものである。乳化燃料滴を加熱すると、乳化燃料中の水滴が急激に沸騰してマイクロ爆発と呼ばれる燃料滴の二次微粒化⁴⁾が生じる(図 5)。そのため、乳化燃料は燃料油のみを燃焼させた場合に比べて燃焼性が向上する。

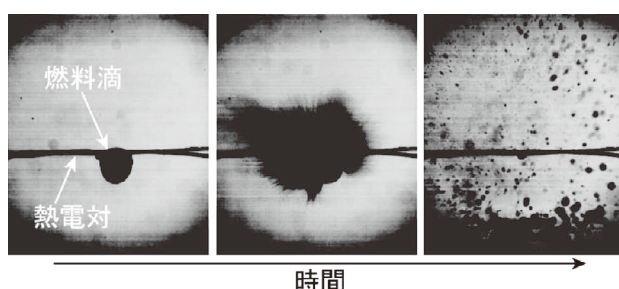


図5 乳化燃料滴のマイクロ爆発挙動(撮影速度:500fps)

乳化燃料をボイラーなどの燃焼装置で使用する場合、燃焼性をより効果的に向上させるためには、乳化燃料滴のマイクロ爆発メカニズムおよびマイクロ爆発が燃焼特性に及ぼす影響を明らかにし、乳化燃料に最適な燃焼条件を把握することが重要である。しかしながら、乳化燃料滴の燃焼時におけるマイクロ爆発発生機構は十分に解明されておらず、乳化燃料の最適燃焼条件に関する理論的考察は行われていない。

【目標】本研究では、重油に水を乳化混合した乳化燃料を対象とし、その基礎的な燃焼特性ならびに反応機構を調査し、マイクロ爆発が燃焼反応に及ぼす物理的・化学的效果を明らかにする。さらに、乳化燃料の燃焼シミュレータを開発し、ボイラーなどの燃焼装置を対象として最適燃焼条件を探索する。

3.3 バクテリアによる有用物質の生産

●有機性廃水を利用した有用物質の生産(有賀 修)

【目的】有機性廃水は一般的に活性汚泥法により処理されているが、これは廃水中の水溶性有機物を微生物細胞として沈殿除去する方法である。排出された余剰汚泥は最終的に乾燥・焼却埋め立てされているが、処分場の不足が新たな問題となっている。これに対して嫌気性消化法では有機物の一部はメタンに変換され、余剰汚泥発生は好気的処理法より小さい。しかし、これまでメタン以外に有価物が研究されていない。通常、廃水処理は負の投資であるため、バイオプロセスの最終段階である廃水処理プロセスでより有用性のある有価物が生産されるならば、廃水処理プロセス全体のコストが低減されるとともに、二酸化炭素発生量も低減できると思われる。そこで、メタン発酵過程で生産される低級脂肪酸からの微生物による有用物質生産を試みる。

【現状】低級脂肪酸を用いた物質生産の研究として、大阪大学の藤田らは酢酸やプロピオン酸からの生分解性凝集物質の生産について検討している。微生物の低級脂肪酸の代謝については知られているものの、有用物質生産の研究については、藤田らの研究以外にこれまでほとんど報告されていない。したがって、低級脂肪酸からの有用物質生産法の構築は循環型社会の構築のために極めて重要な研究テーマであると思われる。

数種類の *Rhodococcus* 属細菌株を用いたこれまでの我々の研究から、*Rhodococcus* 属細菌が酢酸を代謝し、培養液から酢酸が経時的に除去されることが明らかとなり、廃水処理への応用が可能であることが分かった(図 6)。また、これらの細菌が水の表面張力を低下させる界面活性を持つ物質を生産し、培養液の一部を赤潮プランクトン懸濁液に添加することにより、赤潮プランクトンが溶菌されることも明らかにした(図7)。これらの細菌のうちある菌株の培養液が赤潮原因藻の一種である *Heterosigma akashiwo* を著しく溶解することが分かった。

【目標】酢酸などの低級脂肪酸からの有用物質の探索と生産法の確立及び廃水処理法としての最適操作条件の確立を目標とする。

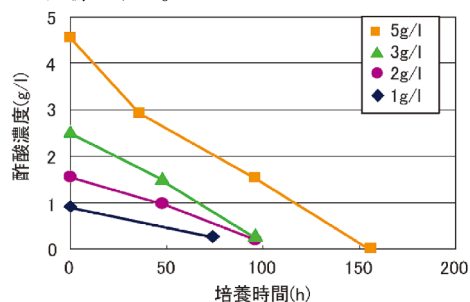


図6 細菌による酢酸の除去

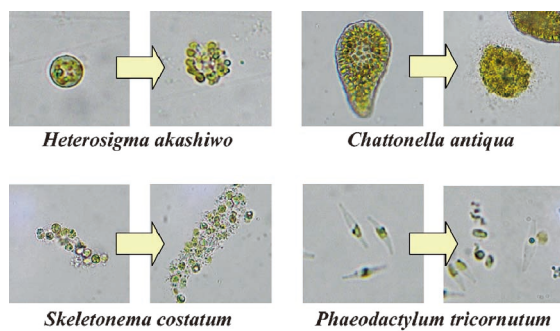


図7 赤潮プランクトンの溶解

●海水由来細菌による機能性色素の生産(榎本恵一)

【目的】室戸岬より採取した色素生産細菌から抽出した機能性色素の生産とその利用法を研究する。

【現状】室戸岬で採取される室戸海洋深層水は環境への負荷が比較的小さい資源であり、その有効利用は地域社会活性化の重要な要素である。我々は室戸海洋深層水から分離した *Pseudoalteromonas* 属のバクテリアが青紫色素(violacein) (図8)を生産することを見出し、この色素が抗がん活性を有することを確認した。ブラジルなどの熱帯地方で分離されたバクテリア (*Chromobacterium violaceum*) によっても同じ色素が生産され、得られた色素はブラジルの風土病であるトリパノソーマ症の治療薬として研究されている。また、この色素は着色材料として利用が図られたこともある。しかし、医薬品、着色材料のいずれの用途でも実用化に至っていない。その一つの原因に、色素の生産菌である *Chromobacterium violaceum* に弱いながら病原性があり、実用のための色素の大量生産に向いていなかったことがある。室戸海洋深層水から分離されたバクテリアは病原性をもたないと考えられるため、色素の生産を行う場合の有力な候補となると考えられる。

【目標】色素の商品化を含む利用法と生産方法(量、コスト)について具体的な例を提示し、将来の実用化の可能性を検証する。

4. 今後の環境技術の評価と経営システムの構築

この研究は、①環境に関わる効果・効率性などの戦略目標と要素技術の効果および費用に関わる論理的関係を表す「研究開発ロジックモデル」、②個々の研究開発対象技術の効果および効率性、達成可能性などの確率を基礎とした開発段階毎のオプション設定による研究開発に関わる投資判断を行う「研究開発プロセスモデル」、③達成された「研究開発ロジックモデル」を地域環境経営などにおいて具体化するためのモデル参加者間の負担・利益関係の設計を含む「地域経営モデル」のシステム開発および実践的検証で構成される。

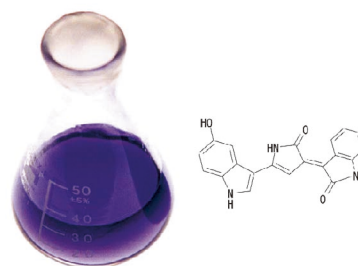


図8 青紫色素(violacein)とその化学構造

4.1 研究開発ロジックモデル

高知県における二酸化炭素の排出量削減を環境経営目標とし、貢献可能な要素技術との論理的関係性を説明する研究開発ロジックモデル⁵⁾を仮定する。研究開発ロジックモデルでは、要素技術の効果およびコストの両方の論理関係を説明する。各要素技術は、効果に対するコスト効率性を確認し、開発プロセスにおいて研究開発ロジックを修正・管理することで経営目標の達成水準を保証する。

具体的な要素技術として「バイオエタノールの生産や高効率太陽電池等の新エネルギー開発」と「木材チップや有機性廃液等を原料とする省資源的物質生産」を取り上げる。

4.2 研究開発プロセスモデル

環境経営目標を達成する為の各要素技術のコスト効率性および開発可能性の目標値を設定し、時系列的に評価した結果に基づき、研究開発ロジックモデルに従って開発の継続の是非、目標値の変更に関わる経営判断を行う。この際、予め経営判断に必要なコスト効率性、開発可能性のモニタリング結果に基づくオプション(選択肢)を設定した研究開発プロセスモデルを設定し、開発初期段階から研究開発の経営リスクを軽減する。

4.3 地域経営モデル

高知県における二酸化炭素の排出量削減を達成する環境経営システムの基本的な構造は、開発プロセスの最終段階で得られる研究開発ロジックモデルの効果に対するコスト効率性に基づき構築する。各要素技術を担う事業者の相互関係において相互利益が確保されることで、持続可能性を確保する地域環境経営のシステム設計を提案するとともに、社会環境、技術環境、自然環境、経営環境の変化に対応した経営システムの持続可能性の安定度および経営システムの見直し方法についても提案する。

謝辞

本研究は、平成19年度私立大学学術フロンティア推進事業「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(代表研究者 榎本恵一)」の一環として行われた。

文献

- 1) F. O. Licht, World Ethanol Markets The Outlook to 2015 (2006)
- 2) Haiirs, E. H., The *Chlamydomons* Sourcebook, Academic Press (1988)
- 3) Banerjee, A., Sharma, R., Chisti, Y., Benerjee, U. *Botryococcus braunii*: A renewable source of hydrocarbons and other chemicals, Criti. Rev. Biotech.2, 245-279 (2002)
- 4) Dryer, F. L., Water addition to practical combustion systems – concepts and applications, Proceedings of the 16th Symposium (International) on Combustion, The combustion Institute, pp. 279-295 (1977)
- 5) Nasu, S., Conceptual structure of new public management ~Design methodology of new public management and system maintenance~, 高知工科大学紀要 4, 3-10 (2007)

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

**Keiichi Enomoto*, Seigo Nasu, Osamu Tomisawa,
Nobuya Matsumoto, Yoshio Inoue, Takeshi Ohama,
Katsuhiko Sumi, Osamu Ariga, Sakae Horisawa, Yoshio Morozumi,
Makoto Hirano, Shunji Kusayanagi and Yasushi Mabuchi**

Graduate School of Engineering, Faculty of Engineering,
Kochi University of Technology
Tosayamada, Kami-city, Kochi 782-8502 JAPAN
E-mail: *enomoto.keiichi@kochi-tech.ac.jp

Abstract : Environmental technology developed by Kochi University of Technology resulted in the foundation of the Center for Environmental Technology and Management. The Center was founded to realize management system models for sustainable regional environment. Environmental technology and management systems are core topics now being studied within the Center. Environmental technologies will be evaluated and integrated into regional management as a result of the Center's research into environmental management systems. Technologies such as energy from biomass, efficient solar batteries and fuel combustion systems, as well as the production of useful materials from organic waste using bacteria are all under development. From research and technological developments at the Center, regional objectives for the environment will be established and environmental management systems constructed using MOT (Management of Technology).