

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2報

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

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, ²tomisawa.osamu@kochi-tech.ac.jp,
³nasu.seigo@kochi-tech.ac.jp, ⁴hirano.makoto@kochi-tech.ac.jp,
⁵sumi.katsuhiko@kochi-tech.ac.jp, ⁶morozumi.yoshio@kochi-tech.ac.jp,
⁷matsumoto.nobuya@kochi-tech.ac.jp, ⁸inoue.yoshio@kochi-tech.ac.jp,
⁹ohama.takeshi@kochi-tech.ac.jp, ¹⁰ariga.osamu@kochi-tech.ac.jp,
¹¹horisawa.sakae@kochi-tech.ac.jp, ¹²kusayanagi.shunji@kochi-tech.ac.jp,
¹³mabuchi.yasushi@kochi-tech.ac.jp

要約：地域環境の改善あるいは保全の仕組みとして「環境経営システム」という新たな概念を設定し、そのシステムの構築について、間伐材のバイオマス燃料としての利用を例として研究した。また、地域企業におけるマネジメントについて調査研究し、技術シーズの事業化に至るプロセスをモデル化した。さらに、要素環境技術として、色素増感型太陽電池の開発と重油燃焼の効率化についての研究を行った。

1. はじめに

環境問題への取り組みは、今後、我が国の地域の維持発展にとって最重要テーマといってよい。しかし地域環境の改善あるいは保全には、環境技術を評価し、地域社会の経営要素として組み入れ、稼働させていく仕組みが必要とされる。すなわち地域環境への取り組みの持続性を担保できる機能が備わってはじめて有効なものとなる。本研究はこのような地域の取り組みを持続させる仕組みとして「環境経営システム」という新たな概念を設定し、地域環境の改善・維持を持続させる具体的なシステムの構築を目指すものである。

システム構築のための具体的方法は、二酸化炭素削減等の、地域における具体的な環境管理目標を設定し、技術経営(Management of Technology)の手法

に基づき、設定目的に向けた環境技術開発を行い、個々の技術開発の費用および効果、開発可能性に基づく論理モデルを構築し、時系列的に開発プロセスを管理してゆくことである。このため本プロジェクトを①「環境技術開発」と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、両プロジェクトの密接な連携によって地域環境システムのモデルを組み上げて行くこととした。

環境技術開発に関して実施した「太陽電池と重油燃焼の効率化」、「バクテリアによる有用物質の生産」、「バイオマスを用いたエネルギー資源の開発」についての研究状況の概要は報告済¹⁾であり、本稿では環境経営システムの構築を中心として報告する。最初に地域環境経営モデルの構造の考え方について、議論し間伐材バイオマス技術を例として地域

経営システムの構築について延べる。引き続き地域企業の調査結果に基づき地域連携事業構築のための要件、地域事業のマネジメントモデルに言及する。さらに地域経営システムにおける生産サブシステムの要素である技術シーズから事業に至るプロセスについて単一企業の技術経営課題について述べ、最後に生産サブシステムの要素技術の一部についての中間成果の状況を報告する。

2. 地域環境経営モデルの構造検討

2.1 環境経営システムのフレームワーク

図1に示すように、環境経営システムは大きく分けて、「入力サブシステム」、「生産サブシステム」、「出力サブシステム」、「経営サブシステム」の4つのサブシステムで構築される。「生産サブシステム」では、バイオエタノールの生成等エネルギー生産に関わる複数の環境技術をチェーン統合し、エネルギー以外の有用な副生成物の生産も目指したシステムとして構築される。「入力サブシステム」は、様々な社会・経済的側面をモデル化し、各種資源から原材料を生成し「生産サブシステム」に供給する。また、「出力サブシステム」は、「生産サブシステム」の生成エネルギーが、様々な市場、社会構造の制約等を条件としつつ、制度・法律の枠組みにより市場原理のもとで利活用を促進するシステムである。この3つのサブシステム全体を統合し、副生成物の利活用を含め、経営のアウトカムである二酸化炭素削減等の環境経営目標を、エネルギー収支、社会全体のコストバランスを制御するのが「経営サブシステム」である。

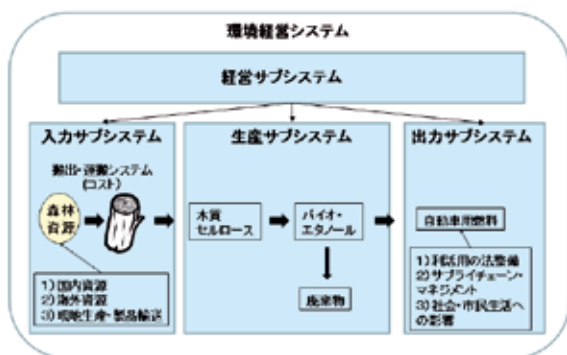


図1 環境経営システムのフレームワーク

2.2 地域経営システム構築に向けた試行

2.2.1 研究開発目標

間伐材バイオマス技術を一例として地域社会の経営システム構築を試行する。具体的には、間伐材バイオマス技術を活用して、「①環境経営目標の達

成」「②農業と林業の活性化」「③エネルギーの自立」による地方の自立・持続可能な地域社会の経営システムの構築を目指す。石油資源の代替エネルギーである間伐材バイオマスが地域の「③エネルギーの自立」を促進するとともに、地域における「①環境経営目標の達成」を同時に成立させる。

地域社会経営システムにおいては、間伐材などの環境資源の公益的機能およびエネルギーとしての価値に対して、その環境資源を整備・維持管理しエネルギーを生産するためにかかるコストを関数化し、両者の価値の部分均衡により利用者(地域住民)と施行者(行政など)の社会的厚生が最大となり、地域社会経営が成立する関係を導出する新たな環境経営の概念を確立する。農業および林業、地域住民は地域社会経営で導出される社会的厚生を享受するとともにコストを支払う経営システムの参加者であり、相互関係において社会的厚生がコストを上回っている必要があり、地域社会経営システムにおいては最大化された社会的厚生の最適配分のマネジメント機能設計を具体化する²⁾。

2.2.2 実施方法・実施内容

本研究は、①材木から製造される木質ペレットによるペレットボイラー開発と効率性、経済性等の各確認研究、②資源供給者である林業と需要者である農家の経営システム構築と、同システムが地域社会および市民から受ける反応を踏まえた地域環境経営システムの構築研究、③地域社会および市民の反応をロジックモデルとしたインパクト評価モデルと経営システム導入実験のモニタリング、の3つの部分で実施する。

まず、ハウス園芸農業における木質ペレットバーナーを利用したハウス暖房システムの加温および燃費性能を明らかにするため、重油を利用した従来型のハウス暖房システムと同条件下での比較実証実験を行い、木質燃料を利用したハウス暖房システムの経済・環境面での優位性を示し、実験地域内での循環型エネルギー生産・消費システムの構築に向けたデータの収集を行った。次に、高知県における林業に係る供給プロセスを調査し、木材バイオマス資源利用のビジネスモデルのコスト関数の試設計を行うとともに、木材からペレットを生産し農家に供給するプロセス(サプライチェーン)について調査した。

地域環境経営システム構築は、資源供給者としての山林所有者・森林組合と、既存の石油供給者である農業協同組合などの団体、需要者としての農家や

地域の市民の、林業や農業の損益モデルおよび市場モデル、他市場との競合や需要農家の先行投資と安定供給に関わるリスク等に対する行動モデル、市民の地域社会経営システムに対する反応モデルにより構成するが、地域問題の構造化からこれらのモデルに関連する論理関係を抽出し、地域におけるアンケート調査等により確認、関数化を行う。

この仮定で得た社会・市民の反応モデルとしてのロジックモデルに基づき、実際に導入した地域におけるインパクト評価を行い、地域環境経営システムの修正を行うとともに、システム構築プロセスを分析することで、全国で試みられている新技術開発とこれをベースとした地域経営システムの具体的、普遍的な方法論を提供する。

2.2.3 研究開発結果・成果

木質ペレットバーナーを利用したハウス暖房システム技術を踏まえた地域社会経営システムは、既存の地域社会において新たな要素と関係を導入するものであり、既存の地域社会を含めた全体構造を把握するとともに、想定される地域へのインパクトと市民・社会の反応を評価する必要がある。そこで、直接のステイクホルダーのみならず、地域社会に住む市民の意識構造をモデル化し、市民が新たな技術導入により構築された地域社会経営システムにより生じる現象に対して、どの様な作用・反応を示すかを評価する必要がある。図2に示したプロセスは、その為の方法論を示したものである。木質ペレットバーナーを利用したハウス暖房システム技術を踏まえた地域社会経営システムを既存の地域社会に導入した場合の問題の構造化においては、その構造に係る仮説を立てることによって実際に地域の調査を行う必要がある。

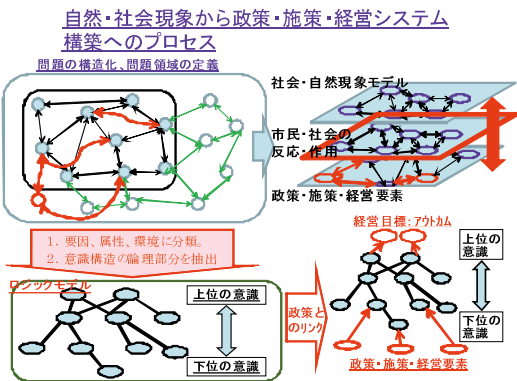


図2 経営システム構築へのプロセス

市民あるいはステイクホルダーの反応に係る要因の論理的構造を記述している部分に着目することで、新たな地域環境経営システムに係る変化に対する市民あるいはステイクホルダーの意識構造のロジックモデルを構築する。この場合、市民あるいはステイクホルダーの属性や地域の特性や社会・自然環境なども含まれる全体の問題の構造からロジックモデルを抽出する。

本検討地域における地域社会経営システムの概念構築には、(1)木材の持続的な供給を図るとともに安定的な林業経営を成立させること、(2)現在、農業経営を圧迫させている原因になっている燃料問題を克服し、農業経営を安定させること、(3)地域環境に影響を与えると考えられている変化に対する市民社会の反応に関わる問題を解決できることが必要であり、これらを踏まえて、地域社会経営システムを概念設計した。現時点における地域経営システムのフレームワークでは、資源供給者としての山林所有者・森林組合と、既存の石油供給者である農業協同組合などの団体、需要者としての農家や地域の市民が、林業や農業の損益モデルおよび市場モデルを介して行動する。また、森林資源には製紙会社、電力会社などの他市場における競争者が存在する。さらに、需要家にはペレットボイラーの購入という先行投資とペレットの安定供給に関わるリスクが存在することも行動に制約を加える。今回の検討では、環境に関わる収支や地域環境変化に対する市民の評価を加えた地域社会経営システムの概念をモデル化した。本検討地域における地域経営システムの素案を図3に示す。

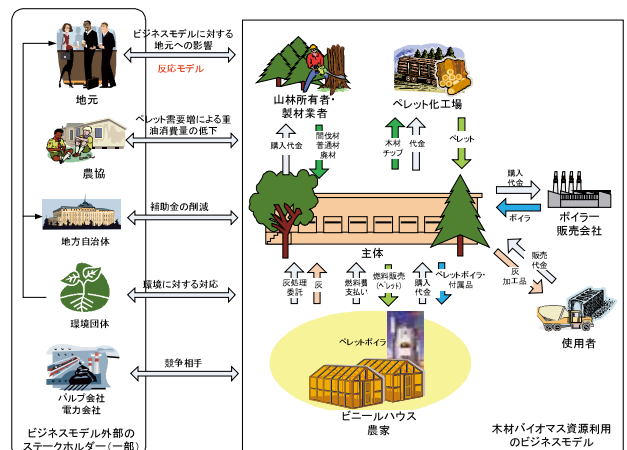


図3 地域経営システムの一例

本ビジネスモデルは、(1)主体が山林所有者や製材業者から木材・間伐材・廃材を調達する(木材供給段階)。(2)山林所有者等から調達した木材をペ

レット工場に搬送しそこでペレット化を行う(ペレット化段階)。(3)ボイラビニールハウス農家に対し、ビニールハウス内の暖房設備として重油ボイラに代替する手段として木材ペレットボイラのシステム一式を納入するとともに、燃料であるペレットの安定供給を行い、その見返りとして各種代金を受領する(ペレットボイラ納入・ペレット安定供給段階)。(4)最後に、ペレットボイラ燃焼の際の副産物として生成される灰を加工品やその他手段により処理する。以上の4段階からビジネスモデルは構成される。なお、本ビジネスモデルは素案段階であり、収支構造分析を実施することにより主体構成や業務内容が変化する。

3. 地域事業のマネジメント・モデル

地域において、様々な技術シーズや資源をもとに事業化を図る場合、特に様々な組織や業態、企業などの連携が必要な場合にはなおさら、そうしたプロジェクトが机上のものでなく実現への道を進んでいくためには、多くの計り知れない「人的努力」が必要であることはいうまでもない。ここでいう人的努力とは、事業の技術的・経済的な側面、あるいは直接的な利害得失だけではなく、人文科学のおよび社会科学の側面、即ちその事業に携わる人々の、自立心、連帯感、価値観、保有知識、思考形式、感受性、文化、企業ミッション、組織特性、はては様々な属人的特性も含んだ上での、「連携を可能とする」メカニズムの構築が必要であるという意味である。

地域事業の多くの失敗は、事業のアイデアそのものは素晴らしいにもかかわらず、それを現場で実行する人々の属人的振る舞いが、かならずしも理想的なものではない、ということに起因していることが多い。これは大企業における現場力が企業の実力となることとも呼応しているが、ひとつの組織体として成立している大企業とはまた異なる地域特有の集団経営の難しさも内包する問題である。

地域社会およびその核となる各地域企業、事業体が、どのような組織論的成り立ちをしており、どのような行動原理によりつき動いていくのか、またどのようにお互いの連携関係が構築しうるのか、こうした人文科学的・社会科学的分析と考察なくしては、地域での実際の事業の遂行は難しい。

我々は、この数年間、日本および中国における地域企業の成功要因の調査・研究を行ってきた。そのため通算100社以上の地域企業を直接訪問して取材し、多くの事例研究を行った³⁻⁵⁾。この研究を通じ

て以下の点を明らかにし、地域における連携事業構築のためのモデル形成を行った。

3.1 資産の活用能力による評価

経営資源の乏しい地域において成功している企業の多くは、従来経営資源として認識されなかった多くの未開拓の天然資源、無形資産(人の暗黙知、文化などを含む)を巧みに活用し価値創造し事業を構築していることがわかった。これは裏返すと、成功している企業においては、通常、保有する資源の活用能力が優れていることが必須条件となっており、こうした活用能力そのものが醸成されていない企業では、逆にどのような豊かな資源を持ち込んでも、これを事業化し、事業の成功へと結びつけていくことは難しいという側面を物語るものである。現実の事業というものは、紙に書いたようなものではなく、現場の当事者たちが、日々、様々な日常的な案件に対して的確で効果的な判断と実行を積み重ね対処していくことを基礎として成り立ち、こうした行為の集積としてはじめて事業全体の成果へとつながってくる。どのような日常での振舞いも事業の成功不成功に無関係ではない。

即ち、企業連携による事業創出においては、第一に対象企業の資源活用能力がどのようなレベルに達しているのか、冷静に評価する必要がある。その能力が一定のものに達していない場合は、外部から資源を持ち込んでも十分に活用されるとは期待できない。従って、まずその現場での資源活用能力の醸成戦略の中で、事業そのものの進展を考えねばならない。

3.2 現場における事業従事者の動機付け・自律性・知識獲得レベルの重要性

地域での事業推進を支えるイノベーション創発には、現場の事業従事者の知識獲得、知識創造が重要な要素であった。一方、その知識活動は、従事者の動機付け・自律性を基礎としているため、現場における事業従事者の内発性を評価し、その度合いに応じて適切な知識創発への誘導策をとる必要がある。こうした意味でも、対象企業の、財務的あるいは技術的評価のみならず、営業能力、組織力などをはじめとした多面的な能力評価とともに、従業員の内発性、自律性、自発性、知識および学習能力、知識活用能力、実行力といった経営行動学的諸側面にも立ち入って、解析し戦略立案をしていく必要がある。特に重要な点は、前記資源活用能力と同様、事業の進展とともに地域企業や事業従事者がどの

ように進化していくか、事業の進展にシンクロナイズさせた組織進化を図りながら、事業全体のグランド・デザインに基づいた組織運営を考えねばならない、という点である。こうした点で、ここで得られた解析結果は、地域事業の展開におけるステージ・ゲート方式の有効性を示唆している。

ステージ・ゲート方式というのは、米国デュポン社によって開発され、日本では旭化成がその普及と啓発に努めた新規事業の形成モデルである。重要な点は、二点ある。

第一点は、新規事業の基礎となるアイデア創出段階から、早い時期から、開発技術者や事業考案者のみならず、生産、販売、営業、人事、サービス、財務など各方面の専門家が事業立案に参画するという点である。これは、とかく技術者中心で事業開拓を考えがちな日本の風土では特に重要なことであり、技術者特有の思考や知識に偏ることなく、市場関係者や異なる視点から発想できる人材との交流によって、総合的に事業立案していく点に注目しなくてはならない。こうした視点の欠落が、かつて日本の「失われた10年」を形作り、製品として市場席卷できない多くの技術開発を行わせてしまった元凶のひとつである。技術者だけで凝り固まらない、異種の発想や知識をもつ人々を寛容に受け入れ、交流するだけの許容性を技術者自身が持つこと無しには、技術の事業化は果たされないことを、我々は日本の歴史の中で学んだのである。

ステージ・ゲート方式の第二のポイントは事業案の進捗を段階的に捉え、段階ごとにゲートという評価の関門を置くことである。これは事業内容の実現性成熟度評価・価値判断を行うということだけでなく、必要な支援をそのつどの段階に適切な形で行なっていく、という思想である。資金的な援助も、各段階にあわせて行い、一度に行わないということであるが、これは助成金や補助金で地域の事業振興を図り、一度資金を与えてしまったらその投資効果について追跡評価解析しない傾向のある日本の行政が、結果的に中々成果のあがらない原因を考え直すヒントであり、極めて示唆に富む手法ではないかと考える。

3.3 リーダーを中心とした人的組織化の進化と事業展開レベルの相関性

事業従事者の内発性誘導として、リーダーの育成とリーダーシップの発揮が重要な契機となることがわかった。特に、地域コミュニティにおけるリーダーには、外部から持ち込んだ暗黙知の伝達者とし

ての側面が強く、そうした外部暗黙知を保有する人材の育成と配置が、地域事業においてはことのほか重要である。このリーダーを中心とした戦略的な組織形成を行い、かつ前記同様、事業の進展にシンクロナイズさせた進化を図りながら、事業全体のグランド・デザインに基づいた組織運営を考えねばならない。もし、適切なリーダーが存在しない場合は、その育成や配置といった点から考えねばならない。しかし、地域の事業というものは、現存している様々な私企業や事業団体そして行政組織から出発しなければならないのであり、理想的なリーダーがあらかじめ存在するケースというのは極めてまれである。従って、地域事業では、現実的には、既存の組織の枠組みの中で、どのようにリーダー的人物を選び、組み合わせ、組織内そして組織間の力学の中でその影響力を浸透させていくか、という極めて複雑な作業を必要とする。しかし、こうした観点からの明確な戦略と視点なくしては、地域での現実の事業形成は難しい。

今後これらの基礎的な知見をもとに、地域における事業の形成モデル・発展モデルを構築し、各地域において具体的にその地域特有の属性を分析しながら、事業化を進めていく必要がある。ここでいうモデルとは、一朝一夕で数値化されるほど簡単なものではないが、アンケート調査や統計による因子解析などの手法を駆使して、少しずつ定量化の方向へと進むことによって、本研究プロジェクト全体での位置付けも次第に明確なものとなってくると考えられる。

4. 技術シーズから事業に至るプロセスのモデル化

地域環境経営モデルにおける生産サブシステムを担うコンポーネントは個々の企業である。まさにここでは要素技術を事業に展開することが要請される。また同時にこれらの企業が持続可能であることも重要な課題である。事業化プロセスは基本的には「知識」に経済的価値を付加し製品、サービスに引き上げていくプロセスであり、市場/社会でのニーズの認識から始まりこれを科学研究から導出された知識をマッチングさせるところから展開する。企業そのものは創業から生存、成長、拡大、成熟のステップを踏み、それぞれのフェーズで事業化のプロセスが進行する。この事業化プロセスと企業の成長プロセスを模式的に図4に示す。

MOT(Management of Technology)の基本的な課題である技術シーズから事業にいたるプロセスのモ

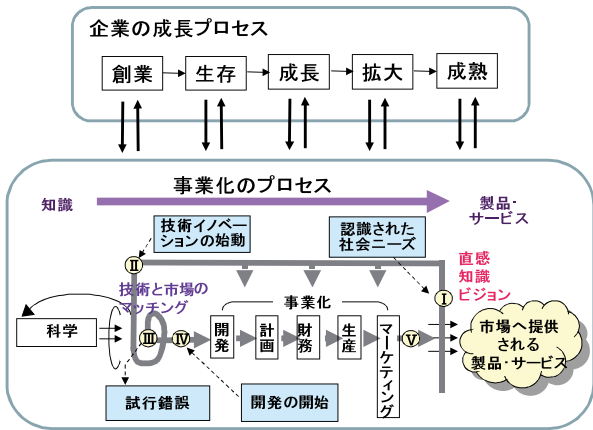


図4 事業化プロセスと企業成長プロセス

デル化、並びに持続可能経営の課題に関して技術経営の視点で特定の中小製造業を選択し詳細な事例研究を行った⁶⁾。ハネロンという社名を持つこの中小製造企業は印鑑彫刻機の製造を原点とし、自動車製造工程におけるナット締付機、電卓検査機、電卓組立ライン制御・検査装置、プログラムロジックコントローラ、ホームエレベータ制御装置、そして独自ブランドであるデータ・メール・アダプターと称する遠隔制御システムコンポーネントなど数々の製品開発を行ってきた。事業規模を一定に保ちつつ、下請けから自立型ビジネスに漸進的に変化しつつ30数年にわたり持続してきた。この企業は多角化戦略を採って成功したのであるが、一般に多角化戦略は多くの場合M&Aによって実行されるか、さもなければ、会社が現在のビジネスとの共通点を何か持たない限りハイリスクであると考えられている。にもかかわらずこの企業は幅の広い多種多様な製品を開発し、多様な市場に投入しビジネスに成功した。新製品開発戦略の古典的モデルであるアンゾフのマトリクスはマーケット軸と製品軸によって構成され、4つのタイプの戦略を提供する。すなわち、既存製品による既存マーケットへの市場浸透、既存製品による新市場開発、既存マーケットへの新製品開発、及び、新製品による新市場参入を狙う多角化である。図5に示すように、このマトリクスに対してあらたな技術軸を設け新技術と既存技術に分割した3次元マトリクスに拡張すれば、本事例の企業は保有する既存技術であるアナログ、デジタル、及び、メカトロニクス統合技術をコアコンピタンスとし、既存技術を利用した多角化戦略を採っていたと解釈でき、これは技術指向の中小製造企業に対して極めて効果的な戦略であると考えられる。

本研究の主テーマの一つである環境技術開発に於いても、バイオエタノール生産技術、白色腐朽菌

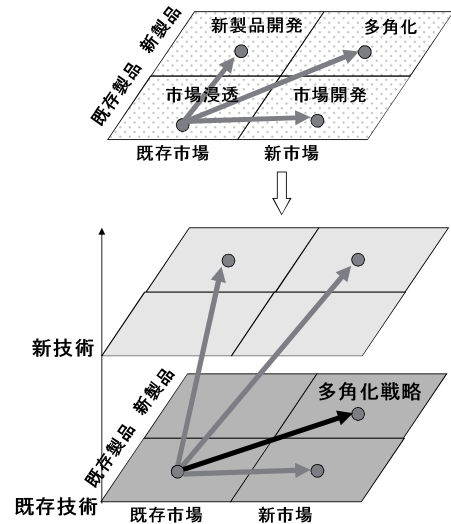


図5 新しい市場拡張グリッド

によるセルロース分解技術、バクテリアによる有用物質生産技術等、多様な要素技術群が存在している。従って、それぞれの基本技術を基盤技術として確立しそれをコアコンピタンスとした製品多角化戦略を採ることが有効であると考えられる。

生産サブシステムを構成する各企業には当然のことながら持続可能な経営が求められる。GreinerやChurchillは図6に示すような企業成長モデルを提示している。しかし前述した事例では、企業の事業規模をほぼ一定に保ちつつ、カスタム製品製造の下請から出発し、自立型に変革し最終的に自社オリジナルブランドの独立したビジネスに移行している。これはあたかも、生物に見られる変態と同様な企業の変態と考えられる。ベンチャー企業の最大の問題は、サイズや売上高による成長よりも、組織の持続可能性であり、また雇用を維持することである。この方針を取るならば、Greinerの成長モデルの革命段階を突破する代わりに、同図中企業サバイバルモデルの曲線に示すような一定のビジネスサイズを保つことを戦略的に選択することも有効であることを示唆している。

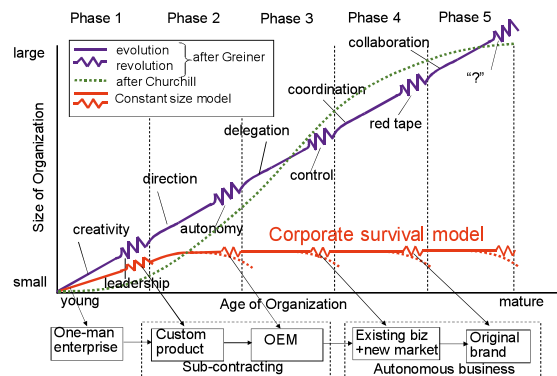


図6 企業成長モデルと持続経営モデル

5. 要素技術開発

本研究で実施した要素技術開発¹⁾の一部として色素太陽電池の開発と省エネルギー的燃焼プロセスの研究について、中間成果を述べる。

5.1 色素太陽電池における色素多層膜効果

5.1.1 序論

エネルギー問題や地球温暖化問題の深刻さが問われる昨今では、石油・石炭などのいわゆる化石燃料をいかに使わずに経済活動を維持発展させるかが大きな課題となっている。この課題を解決するには、種々の省エネルギー化はもちろんのこと、自然エネルギーの活用が不可欠である。自然エネルギーで現在、最も有望視されているのが太陽電池であり、その種類も様々である。既に実用化され、最も普及しているシリコン系太陽電池は、製造過程に真空技術を使用するため製造価格が高価であることに加え、製造時のエネルギー消費量やCO₂排出量も大きい。この問題を解決する次世代型太陽電池の研究が現在進められているが、その中で実用化レベルまで研究が進んできているのが、色素増感太陽電池(DSC)である。しかしながら、現在最も高いDSCの実験室レベルでの太陽電池効率は11%⁷⁾であり、結晶系シリコン太陽電池の21.3%(単結晶)、19.8%(多結晶)、13%(アモルファス)に比べ低いことが大きな課題の一つとなっている。したがって、DSCの太陽電池効率の向上をはかる必要がある。

単結晶半導体を用いたいわゆる湿式太陽電池は1970年代から1980年代後半にかけて盛んに研究されたが、色素の光吸収量を上げるため、非常に厚い多重層膜を形成させる必要があり、色素間の電子移動が遅いため電池効率はきわめて低かった。Grätzel電池⁸⁾以降のDSCは半導体部分に多孔性酸化チタン電極を用いることにより、その表面の吸着色素が単分子層であっても、酸化チタン層が多層であるため、吸光度の十分大きな色素電極を作製でき、電池効率の飛躍的な増加が実現できた。したがって、DSCでは色素吸着は単分子層で行うのが最も効率がよいと一般に考えられるようになった。しかし、色素によっては単分子層よりも多層膜の方が効率の高い場合があるかもしれないとの発想で本研究に着手した。色素のLUMOと酸化チタンの伝導帯との間で生じるエネルギー勾配が、多層膜内部にわたって形成されれば、多層膜でも電子移動反応が不利にならず、かえって逆電子移動反応が抑制され、電池効率が增加することが期待される。

5.1.2 実験

色素および吸着方法以外は、一般的な方法⁹⁾に従った。交互積層膜ではアニオン性およびカチオン性の二種類の色素をそれぞれ0.5mgずつ取り、水1mLに溶解させ、これをアセトニトリル30mLで希釈し、二つの色素溶液とした。既報の方法で作成した多孔性酸化チタン電極をアニオン性から始めて、交互に浸漬させ交互積層膜を作製し、光電変換効率(IPCE)を測定した。また、会合性色素の吸着には色素10mgに水を所定量(0 - 400 μ L)加えペースト状に混合した後、塩化メチレン-メタノール(6:1)混合溶媒に溶かし色素溶液を調製した。あらかじめイソニコチン酸N-オキシドを吸着させておいた酸化チタン電極をこの色素溶液に浸漬させ、多分子層の電極を作製した。

5.1.3 結果および考察

5.1.3.1 交互積層膜による積層効果

交互積層膜を形成させるためのポルフィリン亜鉛錯体を図7に示す。まず、アニオン性色素(1)の溶液に酸化チタン電極を浸漬させ、次いでカチオン性色素(2)の溶液に浸漬させるというように交互に酸化チタン電極を浸漬させ、交互積層膜を作製した。



図7 ポルフィリン亜鉛錯体

積層回数1 - 5において積層するごとに色素吸着電極の吸光度は増大し、積層が起こっていることがわかった。420nm付近の吸収スペクトルではいずれも吸光度が2を超えていたことから、420nm付近の光を99%以上吸収しており、光吸収量はほ

ほぼ同じである。励起状態の色素から酸化チタンの伝導帯への電子移動が積層により不利になっていれば、IPCEが減少することが予想される。しかし、420nm付近のIPCEは積層回数が増加するにつれ、20%から40%程度へと徐々に増加し、この電子移動反応が不利になっていないことがわかった。また、光吸収量が同じであるにもかかわらずIPCEの値が増加するのは、逆電子移動が抑制されたためであると考えられる。積層回数が増加するにつれ、色素の膜厚が増加すると積層膜の上部の色素が光を吸収し、膜上部に優先的に励起種が生じる。そして、ここから電子移動反応が起こっており、膜厚の大きいものほど、ホールと酸化チタンとの距離は長くなり、逆電子移動反応が抑制されたと考えられる。

5.1.3.2 会合性置換基 N-オキシドによる色素の多層膜化

会合性置換基 N-オキシド基をもつポルフィリン亜鉛錯体(3)を塩化メチレン-メタノール(6:1)の混合溶媒に溶かし、あらかじめイソニコチン酸 N-オキシドを吸着させておいた酸化チタン電極を浸漬させ、IPCEを測定したところ、ほとんど光電流(IPCE_{max} ca. 2%)は流れなかった。そこで、わずかな水を色素に加え、これに混合溶媒を加えて調製した色素溶液に電極を浸漬させると、水の添加量(0-400 μ L)が増えるにしたがって、吸着量が増大し、IPCEの値も飛躍的に増大した(IPCE_{max} ca. 60%)。色素を混合溶媒に溶かした後、水を添加しても効果はなかったことから、色素(3)と水との間の相互作用により、水和された(3)が酸化チタン電極に吸着し、この水が色素のLUMOと酸化チタンの伝導帯との間のエネルギー勾配形成に有利に働いていると考えられる。

5.1.4 今後の展望

ポルフィリン亜鉛錯体は可視光吸収の波長領域が狭く、高い電池効率は望めない。したがって、本来高い電池効率を持つルテニウム錯体を用いてその積層化を図り、同様な効果が発現すれば、これまでにない高効率な太陽電池ができるのではないかと期待している。

5.2 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

5.2.1 はじめに

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・中型ボイラでは燃料として

主に重油が使用されているが、近年のCO₂による地球温暖化や原油価格の高騰により、重油を使用している既設のボイラにおいては燃料使用量の削減が急務な課題となっている。重油使用量を削減するための手段の一つに、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、マイクロ爆発と呼ばれる燃料滴の二次微粒化が生じる¹⁰⁾。そのため、乳化燃料は燃料油のみを燃焼した場合に比べて燃焼性が向上すると言われている。

乳化燃料をボイラなどの燃焼装置で使用する場合において燃焼性をより向上させるためには、乳化燃料滴のマイクロ爆発発生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、乳化燃料の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メカニズムは十分に解明されているとは言えず、マイクロ爆発が燃焼反応に及ぼす影響は十分に議論されていない。

そこで本研究では、重油に水を乳化混合した乳化燃料のマイクロ爆発発生メカニズムの解明を目的とし、乳化燃料滴のマイクロ爆発発生に及ぼす加熱条件および乳化条件の影響を実験および数値解析の両面から検討した。

5.2.2 実験

本研究では燃料油には重油のモデル物質として *n*-ヘキサデカンを用い、乳化剤には非イオン界面活性剤 Solgen 40 (第一工業製薬)を使用し、ホモジナイザ(回転数 10,000rpm、攪拌時間 5min)により油中水滴型乳化燃料を生成した。今回使用した乳化剤のHLB値は4.3である。乳化条件として、乳化剤添加率は1.0vol%一定とし、含水率は $X_w = 0.1, 0.2, 0.3$ とした。

次に、得られた乳化燃料滴の加熱実験を行った。図8に実験装置の概略を示す。R熱電対(線径100 μ m)に乳化燃料滴を懸垂し、所定の温度に設定した電気炉内に挿入することにより、乳化燃料滴を加熱した。加熱中の乳化燃料滴を高速度ビデオカメラにより撮影(撮影速度500frames/s)するとともに、乳化燃料滴温度を測定した(サンプリング間隔100ms)。乳化燃料滴の初期液滴径は1.5-1.8mmであり、加熱条件として、電気炉温度 $T_f = 700, 800, 900^\circ\text{C}$ において実験を行った。撮影した画像および温度測定からマイクロ爆発発生時の温度およびマイクロ爆発発生までの待ち時間を求めた。実験は各条件

において25回行い、マイクロ爆発温度 T_{ex} および待ち時間 t_{ex} はそれぞれの分布関数が0.5となる値とした。

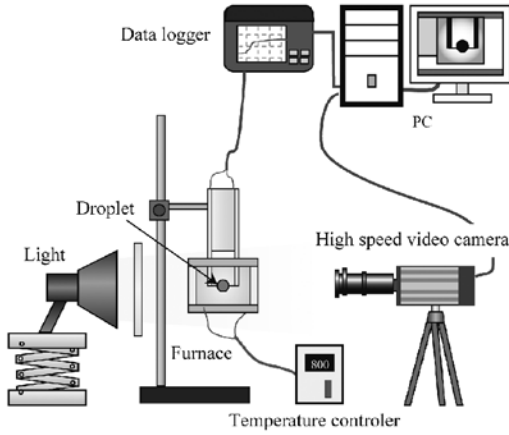


図8 実験装置概略

5.2.3 数値解析

半径 r_w の水滴が分散している乳化燃料滴(半径 r_e) が電気炉内で加熱されているとし、乳化燃料滴中の油相に対して熱伝導解析を行った。次式に一次元球座標系における非定常熱伝導方程式を示す。

$$(1 - X_w) \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) - q_w$$

ここで ρ は密度、 c_p は比熱、 T は温度、 λ は熱伝導率である。また q_w は油相と水滴との間の熱交換速度であり、水滴は水の飽和温度において蒸発潜熱を吸熱し、その後、飽和温度以上に過熱されるものとする。水滴中における気泡核の生成速度は次式より求める¹¹⁾。

$$J = n_T \frac{kT_w}{h} \exp\left(-\frac{4\pi r_{cr}^2 \gamma}{3kT_w}\right)$$

ここで n_T は水分子の数密度、 k はボルツマン定数、 h はプランク定数、 r_{cr} は気泡の臨界核半径、 σ は界面張力である。得られた気泡核生成速度と用い、次式によりマイクロ爆発強度を求める¹²⁾。

$$K_{ex}(r) = \int_0^r 4\pi r'^2 J(r') dr' \cdot M(r)$$

$M(r)$ は半径 r より外側の乳化燃料滴質量である。

解析は、乳化燃料滴半径 $r_e = 0.8\text{mm}$ 、水滴半径 $r_w = 1.0\mu\text{m}$ 、含水率 $X_w = 0.1, 0.2, 0.3$ 、電気炉温度 $T_f = 700, 800, 900^\circ\text{C}$ に対して行った。

5.2.4 結果および考察

図9に $T_f = 800^\circ\text{C}$ 、 $X_w = 0.2$ における乳化燃料滴温度の経時変化の実験値および液滴表面付近の水滴温度と液滴中心の油相温度の解析結果を示す。実験では、加熱開始から1.98sでマイクロ爆発が発生し、爆発時の温度は 205.7°C であった。一方、解析では、液滴表面付近の水滴が過熱限界温度(= 267°C)¹³⁾に達した時、液滴中心温度は 209°C であり、実験におけるマイクロ爆発発生時の温度とほぼ同じ温度であった。さらに、表面付近の水滴が過熱限界温度に達するまでの時間は実験におけるマイクロ爆発発生までの待ち時間とほぼ同じとなった。これより、液滴表面付近の水滴が過熱限界温度に達し、蒸発することによりマイクロ爆発が発生すると示唆される。以後、液滴表面付近の水滴が過熱限界温度に達した時点の液滴中心温度をマイクロ爆発温度の解析値とする。

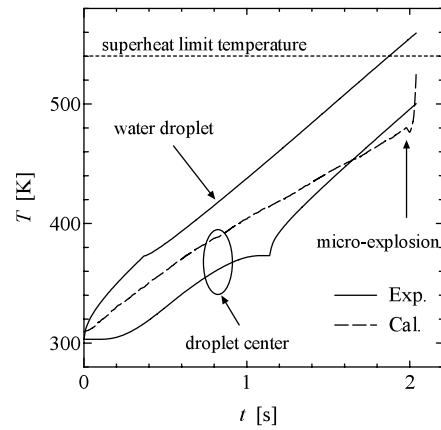


図9 液滴温度の経時変化($T_f = 800^\circ\text{C}$, $X_w = 0.2$)

図10に、電気炉温度とマイクロ爆発温度の関係を示す。実験および解析結果ともに電気炉温度が高くなるとマイクロ爆発温度が小さくなる傾向を示しているが、解析結果の方が電気炉温度の影響が大きい。

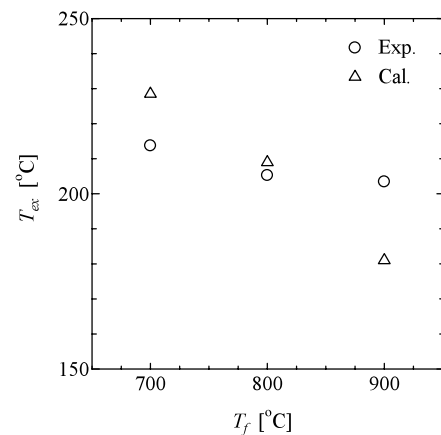


図10 電気炉温度とマイクロ爆発温度の関係($X_w = 0.2$)

図 11 に各電気炉温度におけるマイクロ爆発強度の解析結果を示す。電気炉温度を高くするとマイクロ爆発強度が小さくなる傾向が見られる。また、液滴中心から外側に向かってマイクロ爆発強度が高くなっていることがわかる。電気炉温度を高くすると液滴表面付近の水滴が過熱限界に達するまでの時間が短くなる。そのため、液滴内部に熱が十分伝わらず、液滴内部の温度は電気炉温度が低い場合に比べて低くなる。その結果、乳化燃料滴中で生成される気泡の数が少なくなり、マイクロ爆発強度も低くなると考えられる。 $T_f=900^\circ\text{C}$ において実験値が解析結果よりも高くなっているが、これはマイクロ爆発強度が低いため、過熱限界温度に達した後も過熱されたためであると考えられる。一方、 $T_f=700^\circ\text{C}$ において実験値が解析結果より低くなっているのは、過熱限界に達する前にマイクロ爆発強度が十分に高いためマイクロ爆発が発生したと考えられる。

図 12 に含水率とマイクロ爆発温度の関係を示す。実験においては、含水率が 0.2 から 0.3 に増加することによりマイクロ爆発温度が低下しているのに対し、解析では含水率が増加してもマイクロ爆発温度に変化は見られなかった。

図 13 に各含水率におけるマイクロ爆発強度の解析結果を示す。含水率が高くなるにつれてマイクロ爆発強度が高くなっている。水滴温度は含水率によらずほぼ同じ値であったことから、含水率が高くなると水滴個数が増加し、乳化燃料滴中の水滴で生成する気泡核個数が増加するため、マイクロ爆発強度は増加すると考えられる。このことは、含水率が増加するとマイクロ爆発が発生しやすくなることを意味する。すなわち、含水率が高くなるとより低い乳化燃料滴温度でマイクロ爆発が発生するという実験結果を説明するものであると示唆される。

5.2.5 まとめ

油中水滴型乳化燃料滴の加熱条件および乳化条件がマイクロ爆発の発生に及ぼす影響を実験的に検討し、さらに乳化燃料滴内の熱伝導および気泡核生成を考慮した数値解析を行い、マイクロ爆発発生に及ぼす気泡核生成の影響を考察した。その結果、乳化燃料滴に分散する過熱水滴中の気泡核生成挙動により、マイクロ爆発発生に及ぼす加熱条件および乳化条件の影響を定性的ではあるが説明できることが示された。

今後、乳化燃料滴のマイクロ爆発挙動を考慮した燃焼シミュレーションモデルを構築し、ボイラなどの燃焼装置を対象とした最適燃焼条件の探索を行う。

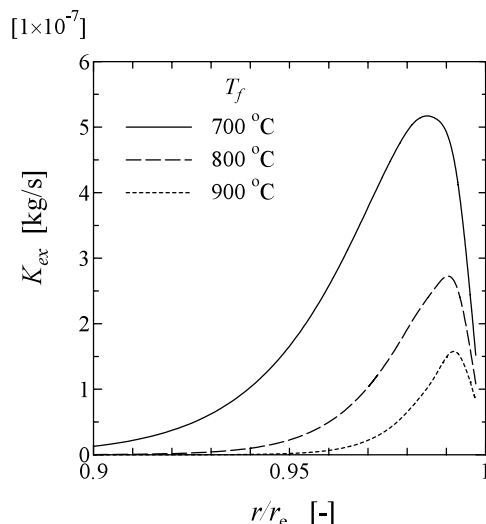


図 11 ミクロ爆発強度に対する電気炉温度の影響 ($X_w=0.2$)

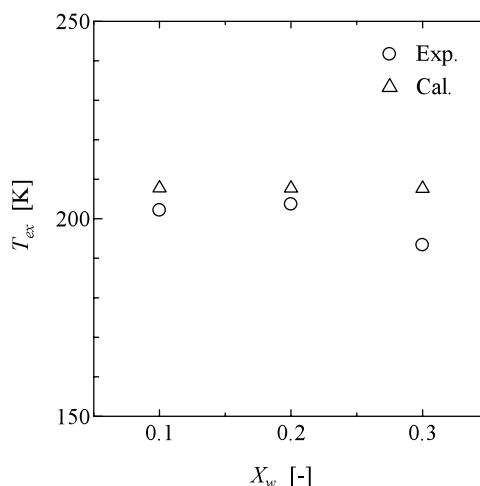


図 12 含水率とマイクロ爆発温度の関係 ($T_f=800^\circ\text{C}$)

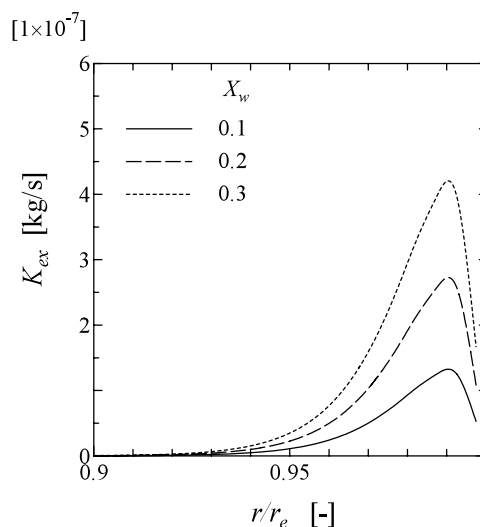


図 13 ミクロ爆発強度に対する含水率の影響 ($T_f=800^\circ\text{C}$)

6. おわりに

本研究では、間伐材のバイオマス利用に関する地域環境経営モデルの構築、地域企業のマネジメントとその成長戦略、および要素技術開発の中間報告として太陽光発電と省エネルギー的燃焼シミュレータについて述べた。今後これらの要素技術を組み込んだ地域環境マネジメントシステムへと発展することを目指したい。

謝辞

本研究は、平成20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」による援助を受けた。

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”、高知工科大学紀要、Vol.5、No.1、pp.91-98、2008年12月。
- 2) 那須、“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”、JSTシンポジウム、2008年12月。
- 3) 高知工科大学大学院起業家コース著、“『共育』宣言”、丸善出版販売、2008年3月。
- 4) 平野真、“地域発『価値創造』企業”、丸善出版、2008年5月。
- 5) 高知工科大学大学院起業家コース著、“我らダイヤモンド企業”、丸善出版、2008年12月。
- 6) O. Tomisawa and M. Hashimoto, “Sustainable management for small R&D-oriented manufacturing firms” , IEEE IEMC, June 2008.
- 7) Y. Chiba, A. I. Slam, Y. Watanabe, R. Komiya, N. Koide and L. Han, “Dye-sensitized solar cells with conversion efficiency of 11.1%” , Jpn. J. Appl. Phys., Vol.45, No.25, L638-L640, 2006.
- 8) B. O’ Regan and M. Grätzel, “A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films” , Nature, Vol.353, pp.737-740, 1991.
- 9) G. J. Meyer, “Efficient light-to-electrical energy conversion: nanocrystalline TiO₂ films modified with inorganic sensitizers” , J. Chem. Educ. Vol.74, pp.652-656, 1997.
- 10) F. L. Dryer, “Water addition to practical combustion systems: Concepts and applications” , Proc. 16th Symp. (Int.) Comb., Pittsburgh, pp. 279-295, 1977.
- 11) W. Rohsenow, J. P. Hartnett and E. N. Ganic, Handbook of Heat Transfer Fundamentals 2nd Ed., December 1985.
- 12) W. B. Fu, L. Y. Hou, L. Wang and F. H. Ma, “A unified model for the micro-explosion of emulsified droplets of oil and water” , Fuel Proc. Tech., Vol.79, pp. 107-119, October 2002.
- 13) C. T. Avedisian and R. P. Andres, “Bubble nucleation in superheated liquid-liquid emulsions,” J. Colloid Interface Sci. Vol. 64, pp. 438-453, May 1978.

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

The second report

**Keiichi Enomoto¹, Osamu Tomisawa², Seigo Nasu³, Makoto Hirano⁴,
Katsuhiro Sumi⁵, Yoshio Morozumi⁶, Nobuya Matsumoto⁷, Yoshio Inoue⁸,
Takeshi Ohama⁹, Osamu Ariga¹⁰, Sakae Horisawa¹¹,
Shunji Kusayanagi¹² and Yasushi Mabuchi¹³**

Graduate School of Engineering,
Kochi University of Technology
185 Miyanokuchi, Tosayamada, Kami-city, Kochi 782-8502 JAPAN

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

Abstract: A novel concept, “environmental management system”, was proposed as a mechanism to improve and maintain regional environment. As an example, we studied on the construction of a management system for utilizing timber produced by thinning as biomass fuel. In addition, management of regional industries and models of processes for industrialization of technological seeds were investigated. Research on dye-sensitized solar cells and improved combustion processes of fuel oil, key technologies for environmental management, were also reported.