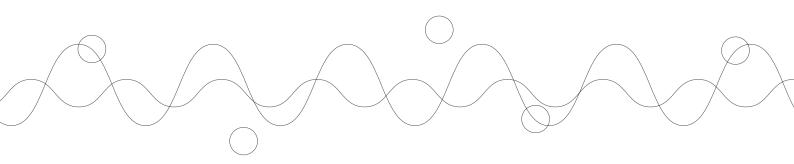
科学技術未来戦略ワークショップ 「自然エネルギーの有効利用~材料からのアプローチ~」 微小生物を利用したバイオ燃料生産基盤技術 報告書

平成20年7月5日(土)開催



Executive Summary

当センターでは、2007年秋より洞爺湖サミット(2008年7月6日開催)に向けて戦略提言をすべく横断的プロジェクト「GIES(Global Innovation EcoSystem)プロジェクト」を発進させ、2008年3月1日に「戦略提言」として中長期の重点課題を報告書にまとめた。本報告書中の一つの提言において、地球規模的課題を解決し低炭素社会を実現するために「自然エネルギーの有効活用」は不可欠であり、特に日本の先端技術力を生かした太陽光発電、太陽光水素生成、非食料系バイオマス(陸生、水生・海生)が重要課題であるとの指摘を行っている。今回のワークショップは、戦略提言中の非食料系バイオマスについてさらに精査し、「バイオマスの有効活用」としてより具体的な戦略提案を行うために開催されたものである。

非食料系バイオ燃料の研究開発については、現在、陸に生息する植物のセルロース利用に主眼を置いた技術開発が国内各府省で盛んに取り組まれている。これらはほとんど基礎研究のフェーズが終了し、生産技術、言い換えればコスト問題に重心が移り始めている。一方、バイオマス資源として、陸生以外の植物、例えば水生植物等に目を転じると、我が国は海洋国家でありながら系統的な研究開発がほとんど行われていない状況である。そこでワークショップでは、議論の中心を水生・海生バイオマスに据え、1.日本が確実に牽引できる先端技術はどの分野であるか、2.技術を国際的に展開できるか、3.公的資金の導入が必要か、などを視点にして中長期の課題抽出を試みた。とくに、より科学的な視点で燃料生産システムを捉え、従来にない新しい燃料生産のコンセプト確立を目指すため、敢えて陸牛バイオマスもスコープから除外しなかった。

ワークショップで得られた最終的な結論が表にまとめられている(図1)。水生・海生バイオには明らかに今後取り上げるべき課題が存在しているが、陸生バイオにも共通する課題としてオミクス(遺伝子・タンパク質等の大規模情報)をベースとする酵素や微生物の改変といった課題が新たに抽出されている。ワークショップでは、そのような研究開発を実施するにあたっては、理学・医学・工学など複数の分野にわたる研究者が参画して、関係各省の連携の下、本研究開発が推進されることが必須との結論を得た。

本ワークショップ担当プロジェクトチームでは、ワークショップ後も継続して出席された有識者へのインタービューを行った。その結果の総括と

して、次のような研究課題の設定が可能であるとの予備的な結論に達している。

(1) バイオ燃料生産微生物の人工合成技術の開発

微生物代謝物のプロファイリング解析、細胞における代謝変動予測システムの開発、人工代謝経路のインシリコデザイン技術の開発、細胞の耐性強化技術の開発など。

(2) 天然微細藻類の燃料生産機構の解明

炭化水素生産藻類の比較ゲノム解析、藻類における燃料代謝経路の解析、光合成藻類における光受容および炭酸固定機構の解明など。

(3) バイオ燃料生産多機能藻類の創製

人工代謝経路の藻類への導入技術の開発、バイオ燃料の高濃度蓄積藻類の創製、燃料生産および炭酸ガス固定能を向上させた多機能藻類の 創製など。

		樹	陸生微小生物	栁		水生-	水生-海生微小生物	、生物
	前処理	糖化	糖化後処理	エタノール発酵	濃縮•脱水	育種·培養	分離技術	残渣 処理·利用
システム	・前処理システム	・酵素反応リアク タ-		・固体発酵リアク ター	・省エネルキ、一濃縮・脱水システム	・大型培養シス テムの設計(開 放形、閉鎖 系)	・連続処理システムの設計	・糖有効利 用、およびN・ Pミネラル再利 用システムの設計
プロセス 技術	・リゲニンの分解・ 溶出 ・ヘミセルロースの 低分子化 ・セルロース結晶 ・セルロース結晶	・セルラーゼ、成分 量比の最適化・ ・糖化酵素生産 1 性向上技術 ・併行複発酵処 理条件の最適 化	·酵素の回収・ 再利用 ・発酵阻害物の 除去 ・糖化液の濃縮	・連続発酵・高密度充填プロ・ス・高密度充填プロセス・残渣・副産物の処理・利用	・膜による選択的分離、脱水技術 ②天然物 細藻類に	・太陽光を有 効利用する 閉鎖型フォトバ イオリアクター	·連続処理 (乾燥·抽出· 分離)	・へミセルロースの 低分子化(酸 触媒) ・セルロース結晶 型の変換 ・省エネ型破 砕法
兼	・植物細胞壁構造状態の解析・発酵阻害物生 ・発酵阻害物生成機構の解明・リグニン等利用 技術	・高活性酵素の 探索 ・セルラーゼ、成分 量比の最適化 による糖化効 率向上 ・酵素生産性の 向上	受験 様様 大田 を を を を の の の の の の の の の の の の の	・資化性の拡大。 ・高温発酵微生 物の開発 ・阻害物耐性微 生物の開発	おりる際 料生産機 構の解明 ・脱水用膜素を の探索	・増殖及び生 産能に優れ た培養株の 育種 ・アルが川耐性 薬類の開発 ・燃料代謝経 路の解析	・環境調和型 ・環境調和型 ・会有N化合 ・含有N化合 物除去技術 の開発 ・リン脂質の改 ぎ、バイオディー でル化等)	・残渣成分の 分析と構造状 態の解析
共通 基盤技術			新 <mark>規遺伝</mark> ゲ <i>ル</i> 酵素の改変・強 微生物の改	新規遺伝子源探索(メタゲノム、メタトランスクリプトーム) ドノム情報活用(バイオインフォマッティクス) 酵素の改変・強化(タンパク質エ学、進化分子エ学的手法) 微生物の改変・強化(ゲノムエ学、ミニマムゲノム手法)	ム、メタトランスクリプトー インフォマッティクス) き、進化分子工学 C学、ミニマムゲノムラ	-4) :的手法) 手法)		③バイオ燃料生産多機能薬類の創製

図1. ワークショップの結果と考察

今後の投資が 必要

既に投資が行 われている 現在のバイオ燃料研究は、微生物や酵母などの陸生微小生物を活用したエタノール生産が主流となっており、一部の基礎研究を除いてほぼ網羅的に投資が行われている。 一方、水生微小生物についてはバイオディーゼルの生産システムの開発プロジェクトが進行してはいるものの、バイオガソリンなど新世代バイオ燃料に関する研究開発はほ とんどが未着手となっている。これらの結果から、CRDSでは投資対象課題のうち、技術が成熟しつつある①微生物等の人工合成に関する研究課題と新たな発見により今後 の展開が期待される②燃料生産藻類の機能解明に関する課題、そして①と②の融合による③新規多機能藻類の創製に関する課題、を重要領域として抽出した。

目 次

Executive Summary

[1]	はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・ 1
[2]	ワークショップの趣旨・・・・・・・・・・・・・・・ 3
[3]	セッション I (陸生微小生物を活用するバイオ燃料生産の可能性)・ 6
3.1	次世代セルラーゼの開発(NEDO での取組を含む)
	森川 康(長岡技術科学大学)・・・・・ 6
3.2	バイオリファイナリーに向けてのリグニン生分解系解析と分解触媒 開発の重要性
	渡辺隆司(京都大学)・・・・・・・10
3.3	バイオマス全てを有効利用するための革新技術
	松村幸彦(広島大学)・・・・・・・14
3.4	最新メタボローム解析技術と今後の研究課題
	柴田大輔(かずさ DNA 研究所)・・・・・19
3.5	合成生物学の重要研究課題
	近藤昭彦(神戸大学)・・・・・・・23
3.6	クローズド発酵サイクルの最重要研究課題
	福崎英一郎(大阪大学)・・・・・・・26
3.7	セッション [のまとめ・・・・・・・・・・・30
3.8	セッション [総合討論・・・・・・・・・・・・32
3.9	セッション [の記録・・・・・・・・・・・・・37
	セッションⅡ(水性微小生物(微細藻類)を活用するバイオ燃料生産の
可能	生・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・43
4.1	具体的な藻類利用技術開発概論
	原山重明(中央大学)・・・・・・・43
4.2	緑藻類からのバイオディーゼル生成技術と重要研究課題
	渡邉 信(筑波大学)・・・・・・・46

4.3	光合成利用微生物の培養技術と重要研究課題
	都筑幹夫(東京薬科大学)・・・・・・5C
4.4	大型藻類の利活用技術と展望・戦略
	能登谷正浩(東京海洋大学)・・・・・・53
4.5	セッションⅡのまとめ・・・・・・・・・・・56
4.6	セッションⅡ総合討論・・・・・・・・・・・・57
4.7	セッションⅡの記録・・・・・・・・・・・・・・62
[5]	セッション皿 総合討論・・・・・・・・・・・・66
5.1	マリンバイオによる燃料生産への期待
5.2	松永 是(東京農工大学)・・・・・・66 バイオ燃料の利用と普及に関する現状と課題
	大聖泰弘(早稲田大学)・・・・・・・68
5.3	討論とセッションⅢのまとめ・・・・・・・・・・73
5.4	セッションⅢの記録・・・・・・・・・・・・・・78
[6]	ワークショップのまとめと考察・・・・・・・・・82
6.1	ワークショップのまとめ・・・・・・・・・・82
6.2	CRDS の考察・・・・・・・・・・・・・・・83
App	endix 1 ワークショップの開催日時、場所、プログラム・・・・・87
App	endix 2 アンケートのプレリサーチシート・・・・・・・88
App	endix 3 ワークショップ参加者一覧・・・・・・・・・・93

はじめに 1.

IPCCの第4次レポートによれば、20世紀後半以降の地球の平均気温 の上昇は90%以上の確率で人為的な温室効果ガスの排出によるものとさ れている。一方で、現在、世界のエネルギー源の太宗を占める石油の生産 量が減少傾向に切り替わるオイルピークは、楽観的な見通しでも今世紀の 半ばであろうと推定されている。地球環境保全と資源制約という中で、わ れわれの生存に欠くべからざる食料とエネルギーの確保は特に重要な課 題である。化石資源に依存した社会は持続的な発展とは相反するものであ り、われわれの将来に必要な資源、特にエネルギー源は自然エネルギー源 に依存せざるをえない。今年7月に洞爺湖で開催された主要国サミットに おいて、福田首相は世界に向けて、2050年を目途として世界の温室効 果ガスを半減するという構想いわゆる「クールアース50」を提言し、こ の目標をUNFCCCすべての締約国と共有し採択することを求めた。こ のような構想の実現にあたっては、省エネルギーの取り組みの国際展開や 新たな資金メカニズムなど国際環境協力と並んで低炭素社会への転換の ための技術的イノベーションが不可欠である。

この技術的イノベーションの重要な一つの課題は、本ワークショップの 課題であるバイオ燃料に関するイノベーションであろう。現在、バイオ燃 料は世界的には、米国のコーンとブラジルのサトウキビを原料とするバイ オエタノールと、欧州を中心に利用されているナタネ油からのバイオディ ーゼル燃料である。しかし、前者についてはコーンの生産拡大に伴う他穀 物への影響や、投機マネーの穀物相場への流入により、わが国をはじめ世 界各国の食料高騰化の原因であると指摘されている。

従って、国際レベルで競争力を持つ、食料と競合しないバイオ燃料生産 の長期的な戦略を構築することが重要である。従来のバイオ燃料技術の中 心は、リグノセルロース物質のホロセルロースの酵素処理やハイブリッド 処理による糖化技術に基盤を置いた技術であるが、従来法とは全く異なる コンセプトによるエタノール生産をはじめとするバイオ燃料生産技術が 期待されている。 また、 国土を海洋に囲まれ排他的経済水域が世界で第6 位の広さを有するわが国は、その特質を生かすためにも、海洋を利用した 微細藻類などの微小生物を利用したエネルギー生産技術が可能と考えら れる。

そこで、それぞれの分野について仮説を設定して、新概念、プロセス、 環境保全などの視点からその仮説を検証し、将来の技術的ブレークスルー を生み出すための戦略的な研究課題と研究推進システムを議論、模索する

ことを目的とした。

JST 研究開発戦略センター(CRDS)では、国として重点的に推進す べき研究領域や課題を選び、そのファンディング戦略を明確にするための 活動を行っている。このような活動の一環として、重要研究テーマについ て専門家による科学技術未来戦略ワークショップを開催してきた。今回、 「自然エネルギーの有効利用~材料からのアプローチ~」微小生物を活用 したバイオ燃料生産基盤技術というテーマでワークショップを開催した。

はじめに

2. ワークショップの趣旨

本章では、ワークショップ冒頭での主催者側(田中上席フェロー、川口 フェロー) からの趣旨説明を要約して記載する。

科学技術振興機構(以下、機構)は、文部科学省傘下のファンディング・ エージェンシーで、戦略指向が強く、トップダウン的な政策に対してファ ンディングを行っている。研究開発戦略センター(以下、センター)は機 構内の企画立案部門であり、2003 年 10 月に独立行政法人化にともな い、理事長の構想に基づき設立された。このセンターは、機構の研究開発 戦略の立案機能やファンディング・エージェンシーとしての体制を強化し、 国全体の研究開発戦略の立案に貢献するという目的で設立され、研究開発 の戦略を練り上げて提案することを主な使命としている。

本ワークショップ「自然エネルギーの有効活用〜材料からのアプローチ ~」を主催する同センター自然エネ活用材料チームの田中リーダーのユニ ットは主として「ナノテクノロジー・材料分野」を担当しており、当該分 野に係る研究開発戦略を「戦略プロポーザル」としてとりまとめている。 戦略プロポーザルの策定にあたっては、ユニット内で「俯瞰ワークショッ プ」を開催するなどして、その分野の技術を広く見渡した俯瞰図を作成し、 その中から、海外との比較などを踏まえ、さらに焦点を絞った研究領域の 抽出を行う。抽出された研究領域は、今回のワークショップのように「深 掘ワークショップ」で有識者による研究戦略の検討を行い、最終的には、 社会ビジョンに合致するような形で戦略を練り、戦略プロポーザルを策定 する。なお、このプロセスにおいて、当センターは、政策立案側と民間を 含む研究開発側の連結役として、戦略策定の機能を果たすことが求められ ている。最終的な提言書である戦略プロポーザルは、科学技術振興機構に ある戦略的創造研究推進事業あるいは戦略的国際科学技術協力推進事業、 さらに文部科学省をはじめとする各部局内の施策立案に活用されるが、こ れらの部局以外にも内閣府・総合科学技術会議などへ直接提案する場合も ある。

本ワークショップは、明日7月6日から開催される洞爺湖サミットを 見通して開催するものである。昨年末よりセンターでは、洞爺湖サミット に向けて戦略提言をすべく、横断的プロジェクト「GIES(Global Innovation Ecosystem) プロジェクト」に着手し、既に戦略提言を今年 2008 年 3 月 1 日に行っている。プロジェクトの副題は「Act Now!

Innovate Yourself for Our Cool Earth」としており、洞爺湖サミット を意識したものとなっている。本プロジェクトにおいては、4 つの提案「自 然エネルギーの有効活用 | 「環境低負荷な交通システム | 「安全な水の提供 | 「高付加価値食料の安定的供給」について研究戦略をとりまとめたが、こ のうちの一つ「自然エネルギーの有効活用」が、今回のワークショップの 主題となっている。GIES プロジェクトは、当センターの正式手順を踏ん でいない緊急提言であるが、本プロジェクトの基となる「自然エネルギー の有効活用」の提案に関しては、内部での精査を経て正式に提案を出す方 向となった。

この GIES プロジェクトでは、自然エネルギーの有効活用が地球規模的 課題を解決するための有効な方策であるという提案を行ったが、自然エネ ルギーは多種多様であり、全てのエネルギー生産に関する研究開発に対し て限られた資源を同規模で投資することは困難であり賢明とは言えない。 そこで当チームでは、特に重要と思われるいくつかのエネルギー生産技術 を取り上げ、それぞれの課題を、1. 日本が確実に牽引できる先端技術は どの分野であるか、2.技術を国際的に展開できるか、3.公的資金の導 入が必要か、などの基準に照らして検討を進め、その結果、前年度に開催 した深掘 WS「太陽光発電・太陽光水素生成」と並んで、先端技術の開発 が必要で社会ニーズも大きい「バイオマス利用技術」を主題として取り上 げ、研究戦略の立案検討のために今回の深掘ワークショップを開催するこ ととした。

バイオ燃料に関する研究開発については、陸に生息する植物のセルロー ス利用に主眼を置いた技術開発に国内各府省が盛んに取り組んでいる。例 えば、経済産業省が発表した「新・国家エネルギー戦略」では、石油依存 度を大幅に低減していくことが掲げられている。また、農林水産省の「バ イオマス・ニッポン総合戦略」では、国産バイオマス燃料を拡大するとい う提言がなされている。さらに経済産業省が発表した「次世代自動車・燃 料イニシアティブ」では、バイオエタノール製造コストを 1 リットル 40 円まで下げるという戦略研究の話もある。これらからバイオ燃料研究は 基礎のフェーズを終了し、生産技術、すなわちコストの問題に重心移動し ていることが推察される。

我々のチーム内における調査でも、上記のような生産技術の開発に関す るプロジェクトが主として進行中であることが確認されたが、バイオマス 資源として陸生以外の植物、例えば水生植物等に目を向けてみると、我が 国は海洋国家でありながらこれらの研究開発の取り組みはほとんど未着

手であることが明らかになった。そこで、関連する研究者へのインタビュ 一等を実施し基礎研究を含めた国の研究開発投資の可能性について検討 を行ったところ、我が国が歴史的に強みを持ち、希少な海洋資源である藻 類の活用技術に対する取り組みが重要ではないか、すなわち、より科学的 な視点で燃料生産システムを捉えることにより、従来にない新しい燃料生 産のコンセプトが確立できるのではないか、という仮説の設定に至った。

以上を踏まえ、本ワークショップでは、第一線の有識者に既存の技術の 延長線上にある「次世代」技術に加え、その先、すなわちバイオ燃料に関 する研究開発の「次々世代」を見据えたファンディング戦略の検討をお願 いすることにした。

「セッションI 陸生微小生物を活用するバイオ燃料生産の可能性」で は、限りなく 100%に近いバイオマスの有効活用を視座に、革新的な技 術を開発して既利用のバイオマス・エタノール生産を変えていくような提 案についてご議論頂きたい。最終的な生産物の設定をエタノールに限定す るのではなく、バイオガソリン、バイオメタノール、バイオリファイナリ ーなどあらゆる可能性を視野に入れ、将来の戦略基盤を見据えた議論が展 開されることを期待している。

「セッションⅡ 水生微小生物(微細藻類)を活用するバイオ燃料生産 の可能性」では、海洋資源を利用した研究開発に関する重要課題を取りあ げ、特に軽油や重油の蓄積が見出された藻類に主眼をおいて今後の展開の 可能性についてご議論頂きたい。

「セッションⅢ 総合討論」では、セッションⅠ・Ⅱで出された課題に 対して、各省庁との連携体制のありかた、ファンディング資金の活用方法 などの点をふくめ、具体的な推進方策のご提案をいただきたいと考えてい る。

3. セッション I 陸生微小生物を活用するバイオ燃料生 産の可能性

3.1 次世代セルラーゼの開発(NEDO での取組を含む) 森川康(長岡技術科学大学)

食糧としての穀物の収穫量を奪うものとして、バイオ燃料が悪者扱いさ れている。背景には、米国が中心となり、トウモロコシなどの穀物による バイオエタノールの生産を急増させていることがある。

次世代であるセルロース系バイオマスからのエタノール生産が急務と なっている。米国では 2007 年にブッシュ大統領が「Twenty in Ten Initiative」を打ち出した。4、5 年間で約 1000 億円を投資して、セル ロース系バイオマスによるエタノール生産の基礎から実用にかけての研 究をする予定である。米国エネルギー省(DOE、Department of Energy) の実生産プロジェクトとして総額約400億円が投じられた7件の研究う ち、4件がセルロース系バイオマスからのエタノール生産関連で占められ ている。基礎研究への投資額も大きく、アルコール発酵の微生物やバイオ リファイナリー関連の研究開発技術に力を入れている。植物の細胞壁と酵 素、セルラーゼとの相互作用を解明するような基礎的研究を行う「バイオ エネルギー研究センター」にも 400 億円を投じる。またセルラーゼの研 究開発を行う企業 4 社への投資は約 40 億円で、開発費の 50%が補助と なる。

セルロース系バイオマスの酵素糖化技術における問題や課題を述べる。 最大の問題は、セルロースとヘミセルロースおよびリグニンが非常に複雑 な構造をとっており、かつセルロースが結晶構造をとっている点である。 酵素による糖化と、アミラーゼによるデンプンの糖化は、基本的にしくみ が異なる。セルロース系バイオマスの酵素糖化では前処理が必要となり、 酵素の量もアミラーゼによる糖化と比べて数十倍から百倍程度多く必要 となる。

前処理でセルラーゼを作り、糖化してエタノールを生成するという工程 が考えられている。現時点や次世代における開発では、セルラーゼ生産菌 は Trichoderma reesei などの糸状菌となることがほぼ確定している。 いかに、工程の質を高めるかが課題となる。日本では、セルラーゼの研究 者が少ないうえ、研究者どうしも独立して研究を進めている。オールジャ パン的に進めていくべきである。

またセルラーゼは、材料、基質、活性などの各要素の条件が変わると、生 成物の状態も大きく変わってくる。統一的な評価を行わなければならない。 植物細胞壁に関して、構造解析やセルラーゼとの相互作用のしくみの解明などがなされない限り、現時点から次世代にかけてのセルラーゼ技術は進まない。

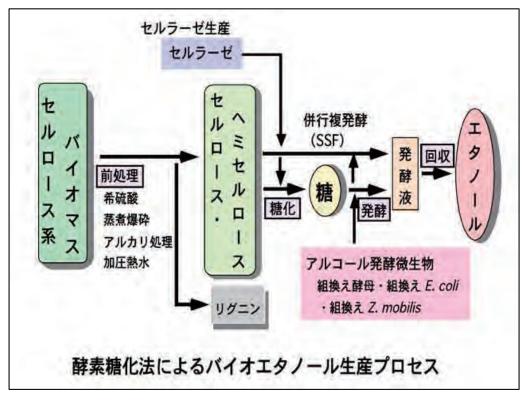


図-1 酵素糖化法によるバイオエタノール生産プロセス

有効な前処理技術の開発や、前処理と酵素糖化との関連性の解明なども 求められる。次々世代のセルラーゼ開発においても、この課題は同じであ る。

日本におけるセルロース系バイオマスからのバイオエタノール生産は、 三井造船などが新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の「バイオマス等未活用エネルギー実証試験事業」 の採択を受け、小規模ながら進めている。また、大成建設が大阪府堺市で、逆有償の建築廃材を使って年間 1400 キロリットルのエタノールを生成しており、世界初の商業生産といえる。同社はヘミセルロース由来のものを作っている。2008年夏よりセルロースの酵素糖化に関する検討も開始するようである。

経済産業省を中心に、農林水産省も参画して 2007 年、バイオ燃料技術革新協議会が発足した。2008 年 3 月に発表した「バイオ燃料技術革新計画」では、2015 年を目標に「バイオマス・ニッポンケース」で 1 リットル 100 円、「技術革新ケース」で 1 リットル 40 円のエタノールを生産することを打ち出している。いっぽう、新エネルギー・産業技術総

合開発機構は「バイオマスエネルギー先導技術研究開発」において、1 リ ットル 40 円を目指す「加速的先導技術」事業を 2008 年より開始した。 3年間にわたり年間20億円の費用を使う。

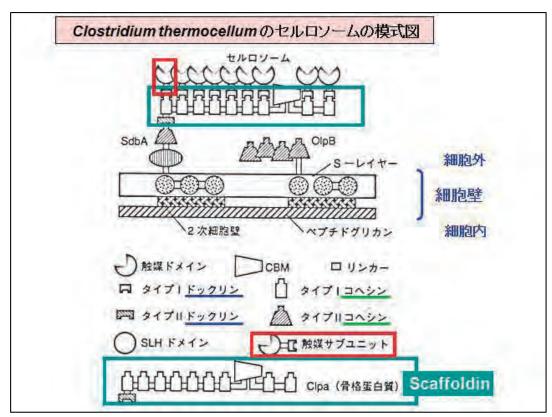


図-2 Clostridium thermocellum のセルロソームの模式図

次々世代のセルラーゼ技術について述べる。微生物のセルラーゼ生産様 式には、セルラーゼ成分をセロビオヒドロラーゼ(CHB、 CelloBioHydrolase)とするもの、小数のエンドグルカナーゼ(EG、 EndoGlucanase) とするもの、多数のサブユニットからなるセルロソー ムの三種類に大別できる。

セルロソームは、ルーメン細菌や嫌気性糸状菌などを一つの大きな複合 体とするものである。細胞壁の外側にスキャフォールディンという酵素活 性のない骨格のタンパク質に触媒サブユニットを付けた形の複合体をな す。Clostridium thermocellum などの嫌気性細菌の表面に触媒サブユニ ットを付ける。

最近の研究では、セルロース結合領域だけおよび酵素サブユニットだけ を付ける骨格タンパク質(Scaffodin)も存在することが判明しており、 セルロソームの構造は多岐に及んでいる。これらの詳細な構造は解明され

[1]

ていない。

セルロソームのアビセル分解能力は、糸状菌セルラーゼの分解能力と比較して数倍から 50 倍も高いといわれている。ただし、その仕組みに関しては未解明で、一番重要な課題である。

セルロソームのゲノム配列は、*Trichoderma reesei* のセルラーゼとはまったく異なる。酵素自体もまったく異なる。*Clostridium thermocellum* はリットル当たり 1 グラムほどのセルロソームしか産出しないが、*Trichoderma reesei* はリットル当たり 100 グラムのセルラーゼを産出する。

次々世代のセルラーゼ開発では、Clostridium thermocellum を中心に、セルラーゼ生産菌の包括的理解が不可欠になる。セルロース分解機構がなぜ優れているのかも未解明なので、バイオマスの構造、セルロースの結晶構造、セルロソームの相互作用などの解明をしていかなければならない。分解機構が判明してくれば、基礎研究として行われているミニセルロソームを用いた技術や、糸状菌を用いた技術への応用も考えられうる。

日本には、セルロソームの研究グループは二つしかない。人材を育成しなければ、米国には太刀打ちできない。

●質疑・討論 アーミング酵母

Q アーミング酵母は、次々世代のセルラーゼ開発の候補として可能性はないのか。

A かぎられた条件では、非常に期待がもてる。しかし、前処理をした生のバイオマスをそのまま用いる際は、アーミング酵母では能力不足になるのではないかと考える。

●質疑・討論 セルロソームの利用時の制約

Q セルロソームを実際に利用するにあたり、制約はないか。

A セルロソームの優れている部分を解明していくことにより、工業的な 形式に変えていくことが必要になってくるだろう。

3.2 バイオリファイナリーに向けてのリグニン生分解系解析と分解触媒開発の重要性 渡辺降司(京都大学)

バイオリファイナリーにおいてリグニンを利用することの重要性を述べる。

リグニンの年間生産量は、植物組織中でセルロースに次いで多い。リグニンは難分解性のため地中に埋蔵しており、その量を含めると地球で最も 豊富な有機化合物であるといわれている。

糖の発酵によるバイオ燃料生産とリグニンの化学資源化はリンクされるべきである。エタノールを安価に生成するには、酵素や前処理の技術改善のみでは解決できない部分がある。リグニンから高付加価値の化学資源を大量に得られれば、全体のコストパフォーマンスを上げることができる。

リグニン分解には、植物細胞壁に埋め込まれたリグニンを低分子化する 段階と、分解したフラグメントをさらに低分子化あるいは構造変換する段 階の、二種類に大別される。

現在、リファイナリー技術の関心や実用が、石油リファイナリーからバイオリファイナリーに移行しつつある。石油リファイナリーは炭化水素が化学の対象だったが、バイオリファイナリーでは、糖、リグニン、油脂が対象であり、酵素も含まれることになり、体系が変化する。とりわけ、プラットフォームとなる基本的な化学品を製造できる企業や国家が、全体の主導権を握ることになる。次々世代では、化学品の体系の変化が大きな潮流となるだろう。

米国エネルギー省でも、プラットフォームとなるべき化合物を提案しているが、これらは脂肪族であり、芳香族は含まれていない。芳香族によるバイオリファイナリーの構想が欠落している中で、日本が体系的に生産する新技術を開発すれば、大規模産業への道が開かれることになる。米国でも、液化による芳香族ガスの生成は技術的に可能であるものの、ファインケミストリーに関しては未開発な部分が多い。いかに芳香族によるリファイナリーを実現するかが焦点となる。

リグニンの分解には様々な方法が考えられる。一つは、リグニンを常温 で分解することのできる白色腐朽菌からそのしくみを学び、応用するとい うことである。リグニンの化学資源化とリンクさせることが重要となる。

白色腐朽菌に関連して、リグニン分解酵素の研究を行っている。白色腐朽菌は、不規則な高分子のリグニンを酵素の表面で酸化させるなどの特色ある機能をもっている。タンパク質単独の機能に関しては、かなり解明が

進んでいる。

しかし、木材の細胞に生えた菌糸が菌体外に酵素を出すと、酵素の分子 直径が大きいため木材の細胞壁内に入り込めないという大きな問題があ る。リグニンと酵素が接触して酵素が働くためには、活性酸素種を生成し て細胞壁を脆くしなくてはならない。

酵素が細胞壁の中に入らず、選択的にリグニンを分解する機能をもった 菌もあり、大きな魅力のある分野である。セルラーゼを発現しないのに分 解するといった機能をもっている。リグニン分解酵素を高発現するような 形質転換体を作っても、逆にセルロースの分解を促進する場合が見られた。

腐朽菌の機能は非常に特徴的であり、単独の酵素だけでは説明のつかない働きをしている点が魅力的である。例えば、反応場の制御という機能があげられる。褐色腐朽菌は活性酸素種を産出する際、鉄イオンがセルロースに優先的に吸着する。その近傍で活性酸素種が生じるため、セルロースを優先的に分解していく。反応場を制御して、腐朽の選択性に影響を与えている。

また、反応特異性の制御も機能としてあげられる。酵素は特異性が高いが、細胞壁を脆くさせることが重要となり、セルロースを使うことがなかなかできない。そこで、細胞壁の中に浸透できるような、小さい寸法の酵素、あるいは酸化触媒やラジカルが有望になってくる。

ラジカルは種類により、リグニンを分解できないものもあれば、分解できるものもある。リグニンの分解が進むと、セルロースが露出する。白色腐朽菌などはリグニンの分解を進めるが、リグニン分解酵素単独で木材を処理してもなかなかそうした現象は起きない。酸化剤の性質として、様々な特異性を持たせることができる。

木材に酸化的ソルボリシス反応を利用すると、木材単独からベンジルアルコール誘導体をワンポット反応で生成することができる。残った糖は糖化発酵してエタノールにすることができる。

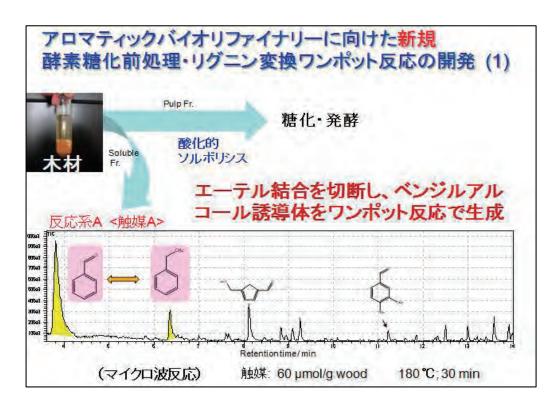


図-3 アロマティックバイオリファイナリーに向けた新規酵素糖化前処理・リグニン変換ワンポット反応の開発(1)

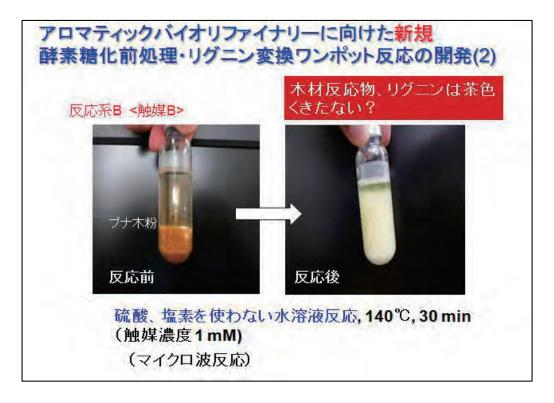


図-4 アロマティックバイオリファイナリーに向けた新規酵素糖化前処理・リグニン変換ワンポット反応の開発(2)

また、ワンボット反応で木材の褐色じみた汚さを解消することもできる。 酸化系に工夫を凝らすと、リグニンが分解してセルロースが膨潤する。すると濾過や洗浄をしなくても、木材反応物は白色になる。残った糖は糖化 発酵でき、可溶化物質は資源として使うことができる。

反応場を制御するための研究を京都大学化学研究所の高谷光准教授と 共同で進めている。京都大学は、金属を付けたアミノ酸をペプチドにして、 金属どうしの相互作用で反応特異性や立体特性をもたせる研究をしてい る。それを会合させて、ミニ酵素の高分子体をつくり、リグニンとの相互 作用で反応場の特性を保持させる。例えば、ペプチドと相互作用が可能な 場を作り、反応特異性と反応場制御性でリグニンの分解をする。

バイオミメティックな反応でリグニンを変換させていく技術が今後は 重要になるのではないかと考えている。

●質疑・討論 ベンゼン系を基盤とする場合の、白色腐朽菌のリグニン分解

Q ベンゼン系物質をバイオリファイナリーの基盤にする場合、白色腐朽 菌はどの程度までリグニンを分解するのか。得られるベンゼン系はどのよ うなものになるか。

A 白色腐朽菌の分解物質として、例えばバデリンやグワエコールなどが生じるが、結果は多様である。菌自体からつくられたリグニンを直接的に利用するのは難しい。むしろ、反応場制御性と反応特異性を制御しうる化学反応を利用するほうが、リグニンの変換には適している。

●質疑・討論 製紙工場で出るリグニンの有効利用

Q 製紙工場で副産物として出ているリグニンの有効利用は考えられるか。 A リグニンは熱量が高く、燃やさないとエネルギー収支が合わないので、 製紙産業の閉じた系の中では燃やしている。今後、リファイナリーのこと を考えると、燃やさず、むしろ化学品として利用したほうが適切であると いう考え方もある。

●質疑・討論 リグニン分解の反応速度

- Q リグニン分解の反応速度はどの程度か。
- A 酸化的ソルボリシス反応を利用したものでは、最短5分程度で可溶化

することができる。また、その他の反応では 15~30 分程度である。

●質疑・討論 次世代研究と次々世代研究

Q 発表した研究内容は、次世代の範疇に入るものか、次々世代のものか。

A 反応場制御性や反応特異性を制御した触媒の開発は、リグニン分解に関してはほぼ未着手である。機能的な設計を化学企業とともに打ち立てていけば、さらに有効な触媒系が開発されていくことになるだろう。そうした点では、次々世代につながる反応系ということができる。

●質疑・討論 芳香族リファイナリーの実用面

Q 芳香族によるリファイナリーに関して、例えば芳香族の汎用的な化学物質を生成するような構想をもっているか。

A 生成された芳香族や生産物をどのように有効利用していくかが問われている。出口側の用途開発と合致させないと実用化はうまく進まない。 大学の一研究室のみが携わるのではなく、大きなグループをつくって研究 開発を進めていくことが重要である。

●質疑・討論 リグニン分解に機能的なラジカル

Q リグニン分解において、実際に機能しているラジカルの種類はどういったものか。

A もっとも有効なラジカルは、ヒドロキシラジカルである。セルロースの構造を脆くし、リグニンを部分的に酸化する。菌によっては、ヒドロキシラジカルの発生場を優先的にセルロースのほうにするものもあれば、発生を抑えて有機ラジカルを発生させリグニンを分解するものもある。褐色腐朽菌や選択性のない白色腐朽菌の類は、ヒドロキシラジカルを多く発生させる。選択性のある白色腐朽菌では、フリーラジカルが大きな誘発力となり分解をする。菌によって機構は様々である。

3.3 バイオマス全てを有効利用するための革新技術松村幸彦(広島大学)

「バイオマスの 100%利用は可能か」という仮説に対して「100%の

利用などしなくてもよいのでは」と回答した。ただし、研究開発している 技術は 100%利用に関連して応用することできるかもしれない。微生物 を活用した中でのバイオマス利用の位置づけを考えるためにも、取り組ん でいる研究を紹介したい。

高熱・高圧の状態を利用した熱水技術の研究を行っている。水は、常温・常圧の条件下では100℃で沸騰する。その際、水の体積は1600倍となる。ところが100気圧の条件下では沸点は300℃ほどになり、体積膨張は12倍にとどまる。218気圧まで気圧をあげると、沸点373℃となり体積変化はなくなってしまう。体積変化がなくなってからの状態を超臨界とよぶ。超臨界では、水と水蒸気の区別がつかないため、沸騰しない。超臨界または液層の水を用いた処理の研究を行っている。

長期間、バイオマスを高温・高圧の水の中におくと炭になる。さらに高温の状態で短期間おくと油となる。水と油は分離するので、油だけを燃やすことができる。さらに高温にして短時間処理すればガスが生成される。

バイオマスや微小生物の利用では、使われなかった部分がかならず生じる。その部分を完全処理することができるという利点が、この超臨界処理にはある。水熱を利用するため、水が反応場となる。水のまま圧力をかけて熱を加える処理は、比較的簡単である。

水熱を利用した前処理も研究されている。バイオマスを高温・高圧の水中に入れると、ヘミセルロースやリグニンの一部が溶解する。また細胞壁構造が崩れる。処理後に酵素を与えれば、迅速に酵素作用が進行する。水熱処理のみで成分を分離する技術や、有用な物質を回収する技術も検討されている。例えば、粉砕キャベツの固形分を 180℃の水で処理すると、ペースト状の均質な状態になる。

高温・高圧の超臨界水は、水の反応性が高いという特徴がある。状態としては水蒸気に近いため、空気や酸素と完全に混合する。また、油とも完全に混合する。このため、空気と油が完全に混ざった状況を実現することができる。加えて高温・高圧のため、水の動きが激しく、反応性が非常に高くなる。水なので環境にもやさしい。

このような性質を利用して、迅速なガス化分解を行う超臨界ガス化を行うことができる。バイオマスと水を混合させ、600°C、250 気圧でガス化し、熱を回収しながら減圧して、発生するガスを得る。含水率の高いバイオマスでは、メタン発酵に通常の処理で2週間から1か月かかるところ、超臨界ガス化技術を使えば処理時間は数分間に短縮される。ただし、超臨界水のエンタルピーは、沸騰水のエンタルピーより高い。そのため乾燥させる場合より多くのエネルギーが必要になる。逆に、熱回収が可能なため、

外部から熱を加えなくても、高温・高圧の状況で生成物だけ取り出すしく みをつくることも可能である。

廃棄物処理を考えた場合、超臨界ガス化技術の利用はコスト的に十分見合うものとなる。例えば、次々世代において、リグニンを取り、セルロースを取ったものの、分解しても取れなかった部分があった場合、超臨界ガス化技術を用いれば完全にバイオマスが分解されることもありうる。

超臨界ガス化の最大規模プラントは、ドイツのパイロットプラントで、量は 1 時間あたり 100kg である。米国では、パシフィック・ノースウェスト社が 1 時間あたり 20kg の可搬型プラントを有している。広島大学は、中国電力との共同研究で 1 日当たり 1 トンの超臨界ガス化プラントを保有しており、鶏糞を連続的にガス化する技術開発も進めている。



図-5 キャベツ粉砕物とその液状化物

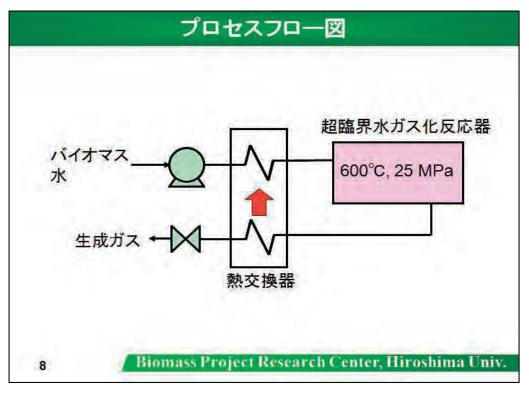


図-6 プロセスフロー図

●質疑・討論 長臨界ガス化プラント大規模化

Q 超臨界ガス化プラントは、どの程度まで大規模化させるのがコスト的にふさわしいのか。

A 1日あたり 10トンが上限と考えている。高温・高圧下で処理するため、プラントの大規模化に伴い膨大な数の反応器を用意しなければならなくなる。また、耐食性の保持も重要になるため二重壁にしなければならないなどの問題が出てくるからである。さらに大量に処理する場合は並列させ、共通処理できる部分を共通化させるなどして、費用を抑える手法が考えられる。

●質疑・討論 前処理のエネルギーとコスト

Q 前処理におけるエネルギー消費量が一番大きいと言うが、コストを考えるときエネルギー回収を含めどうするのが一番よいか。

A エネルギーをどの段階で処理するか、そのためのしくみをどのようにするかに掛かってくる。実用化では、いかにシステムを構築するかが重要となる。バイオマスエネルギーにおいては、技術が優秀であっても普及するとは限らない。エネルギーコストも重要だが、経済的な仕組みの中に入

れていく観点が重要になる。

●質疑・討論 塩水の処理技術

Q 常温・常圧の水では、油は融解しないが塩分は融解する。塩水を利用した場合、超臨界ガス化で処理すると、塩の問題が生じる。ブレークスルーとなる技術は考えられるのか。

A 塩水の中の昆布を超臨界ガス化で処理することは難しい。塩水から塩分だけを取り除く技術が開発されれば、ブレークスルーとなる。いっぽうの側に淡水を流し、もういっぽうの側に塩水を流し、有機物は通さないが塩分は通すような膜を利用して、いっぽうは水の純水化を、いっぽうは塩分濃縮をするといったしくみが考えられる。どの程度の膜技術が必要か、エネルギー技術が必要かが今後の課題となる。

●質疑・討論 鶏糞の超臨界ガス化処理

Q 鶏糞は水に融かすと色が付く。超臨界ガス化で処理すると、鶏糞の液体はどのようになるか。

A 基本的には無色透明な液体となる。水とほぼ見分けがつかない程度になる。

●質疑・討論 超臨界ガス化処理における反応物の発生

Q 超臨界ガス化で処理すると、反応物はどのくらい発生するのか、制御は可能か。

A 超臨界ガス化については、完全ガス化するので、高温・高圧の雰囲気の中での化学平衡計算をすれば求められる。水熱前処理や、材料回収、化学物質回収などにおいては、各種物質の"スープ"が発生してしまう。そこからある特定の物質のみを取り出すことは困難である。180℃程度の温度で前処理を行って細胞壁を壊したあとは、酵素の分解能力に任せるほうがよいと考える。

●質疑・討論 等価エネルギーの検討

Q 超臨界の技術では、等価エネルギーの計算はなされているのか。運用にかかるエネルギーや、材料をつくるのにかかるエネルギー量はどうか。

[1]

A プラント作成において参画した産業技術総合研究所ライフサイクルアセスメント研究センター(2008年4月「安全科学研究部門」に改組)などとともに検討している。二酸化炭素削減効果は出ており、エネルギー的にも効率よく運転できることを確認している。

●質疑・討論 リンの発生

Q 超臨界ガス化で処理をした場合、リン酸等発生の問題は出てくるか。 A 鶏糞を使った場合、窒素とリンの発生が問題となる。窒素は、水の中にアンモニアとして溶解しており、リンはヒドロキシアパタイトとして固体となり、灰として一緒に出てくることを確認している。これを回収すればよい。

3.4 最新メタボローム解析技術と今後の開発課題 柴田大輔(かずさ DNA 研究所)

ゲノムに関連する情報量や技術力は向上しており、遺伝子の動きを RNA から観察することも一般的となった。しかし、タンパク質や代謝物 の観察に関しては、かなり難しい課題も含まれる。

メタボロミクスの問題は、対象のしくみが複雑すぎるという点につきる。 ただし、この複雑さを、生物学的に捉えれば産業的にも価値が出てくるも のと考えている。

メタボロームの複雑さを、植物を例に考えてみたい。植物には基本的な代謝系があるが、仲間の植物に共通する系と、種固有的な系がある。およそ20万種の代謝系があるといわれているが、感覚的には20万種では少ないだろう。その多様性から、様々なバイオマスを利用していこうという議論になっている。今回のワークショップの主題である海藻類の利用に関しても、その多様性を理解する必要がある。

ゲノム研究におけるアノテーションでは「ここに特定の遺伝子がある」 ということがいわれるが、証明の結果わかったことをいっているのではない。むしろ「ゲノムのこのあたりに遺伝子がある」と注釈づけをしているのである。

メタボロームにも、同様のことが行われる。ある傾向のピークに対して、何らかの注釈をつけるということである。このピークが何であるかを徹底的には決めない点が、生物学と天然物化学との違いである。遺伝子と代謝物の関係を生物的機能から捉えたり、新しい代謝系、反応系、生物学的現

象を見つけるとかしている。

当センターでは、9台のシーケンサーを用いて代謝物の解析をしている。 すでに、5万件ほどの測定を行ってきたが、未解明の状況がいまも続いている。 最近、液体クロマトグラフィー-フーリエ変換質量分析計 (LC-FT-MS、Liquid Chromatography Fourier-Transform Mass Spectrometer)を導入して画期的な結果を出している。



図-7 代謝物における FT - MS の利点

代謝系に関しては、分子式が未解明な点が多い。例えば炭素の質量数は 定義的には12であるが、LC-FT-MSを用いて端数のレベルまで精密に 測定すると、計算上、組成式や分子式が決まっていく。少しは良好な結果 を得られたといえる。メタボロミクスでは、分子式が得られたことは、か なりの進展となる。

LC-FT-MS を用いることにより、より精密な分子式を求めることができる。例えば、 $C_{18}H_{19}O_8$ NS は、通常の質量分析計では 410.0 くらいの精度でしか質量数を求められないが、LC-FT-MS では 410.0908 まで求めることができる。逆に、この精度まで求められれば、この分子が $C_{18}H_{19}O_8$ NS から成っているということがわかる。求められた分子式情報をうまく統合していくことで代謝物の構造情報を得ていく。

一回のサンプルを取るのに 60 分かかる。高速液体クロマトグラフィーを用いると、強度(Intensity)を高さとする 3 次元イメージを得られるので、その情報を処理する。専門家が目視でサンプルを解析していたときは 6 か月かかっていたが、コンピュータ化して現在は 30 分で出来る。

この実験技術を利用して、異なるサンプルどうしのクロマトパターンをすべて照合させることができる。例えば、一つのサンプルとして 1000 個を順番づけして 1 次元配列し、それを相互に比較するといった作業が可能となった。これにより、全生物の代謝情報を集約することができる。

現在、その作業を進めており、すでに数種のサンプルをデータベース化している。一画面で、大腸菌、シロイヌナズナ、トマト、アマモ、アマクサ、セッカイソウ、オオバモク、ボタンアオサ、エンセキソウなどの情報を一覧でき、それぞれを比較することができる。例えば、プロスタグランジンの分子式を入力して検索すると、サンプル情報側に反映され、プロスタグランジンは極めて多様性があるということがわかる。

この分野における最大の問題は、研究者のデータベースへの理解が不十分であるということである。

どのようなデータベースを構築すべきかといった議論が少ない。もう一つの課題は、アノテーションの作業量が膨大であるということである。地道かつ継続的な作業を求められる。もう一つの課題は人材不足である。 次々世代にむけて解決していく必要がある。

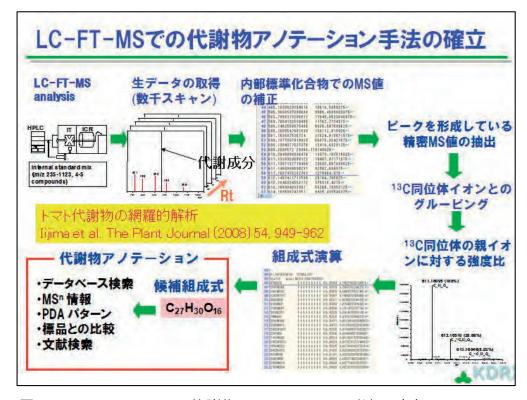


図-8 LC-FT-MS での代謝物アノテーション手法の確立

●質疑・討論 遺伝子とタンパク質の対応関係

Q どの遺伝子がどのタンパク質に対応しており、それぞれのタンパク質がどのような機能をもっているかの解明はどうなっているのか。

A その解明をどのように行うかが課題となっている。ネットワーク解析により、経時的変化の中でどの代謝系が動いているかをグルーピングすることができる。それらの情報を遺伝子の情報と統合させて、何が起きているかを導きだす必要がある。次々世代研究の極めて重要な意義がその点にある。これを実現するには、未解明な代謝物の情報を地道な作業を重ねて得ていかなければならない。研究の質を高く保ちながら、次の研究段階に進むためには、地道な作業が不可欠となる。

●質疑・討論 メタボローム研究の特質

Q メタボロームでは、目的の対象だけでなく全体にわたる情報を広く得ることができる。例えば、遺伝子組み換え生物が、自然界に分布したときに、どのようなことが起きるかといった予測を立てることは可能か。

A 遺伝子組み換えに関しては、遺伝子組み換え微生物を自然界に出すのは危険と考えており、自然界に放出してよいのは植物のみではないかと考えている。これまでのバイオテクノロジーでは、一つの対象物を扱ったときに、それが全体にどう作用するかがわからなかった。代謝系のリンクを理解しなければ、正確でよい結果を生みだすことはできない。

●質疑・討論 フロー解析の可能性

Q バイオリファイナリーを実現するために、メタボローム解析は必要となる。その際、フロー解析を LC-FT-MS などを使って行うことは将来的に可能か。

A フラックスを完全に観測するといったことは、おそらく不可能だろう。 コンピュータ・シミュレーションとスナップショット解析を利用して、代 謝物の同位体から派生する動的な情報を組み合わせてモデルをつくると いった方法がとられると思われる。

3.5 合成生物学の重要研究課題 近藤昭彦(神戸大学)

演題に「合成生物学」とあるが、よりシステム的な育種を行う「合成生物工学」に近い話をしたい。システム的に微生物の育種をしていくことの重要性を提案したい。

米国でも「統合バイオプロセス (CBP、Consolidated BioProcessing)」として取り組まれているが、バイオマスをそれなりに変換したものから、前処理もせず"スーパー微生物"を用いてエタノールに変換する、スーパー微生物の開発が大きな研究課題となっている。

今までのように変異原を与えたり、遺伝子を一つずつ組み換えて、スーパー微生物をつくるというところに、合成生物学の重要性がある。ここでいう合成生物学とは、生物種間を超えて、遺伝子だけでなく代謝経路を含めた組み換えを大胆に行い、新しいものをつくっていく研究を指している。

バイオマスをエタノールに直接的に変換するスーパー微生物をつくる際、セルラーゼの最適なカクテルを細胞表面に集積させる技術が求められる。微生物の上にセルラーゼを最適なカクテルで集積し、細胞の分解・発酵機能によりエタノールに変換する。一つの微生物でエタノール変換までの全工程を行う点がスーパー微生物の特質である。

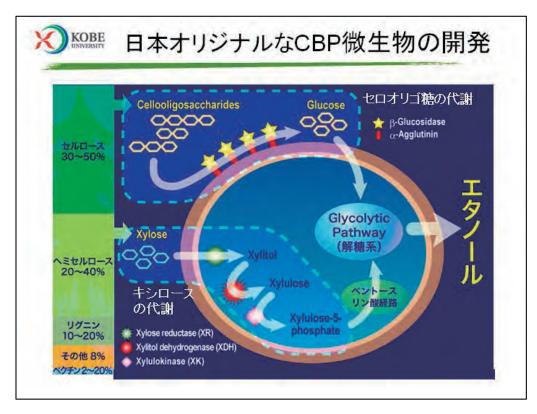


図-9 日本オリジナルな CBP 微生物の開発

ふだん摂取しないものを微生物に摂取させると、細胞レベルで様々な変化が生じる。メタボロミクスやシステムバイオロジーで使われている技術を取り込み、代謝系を工学的に作りこんでスーパー微生物を作る必要がある。日米欧ではじめられているが、これらの技術の強化が、バイオリファイナリー全体を考える上で重要であると考えている。

次々世代のバイオ燃料に関しても、世界中で様々な種類や手法が検討されている。例えば、将来的な視野に入れられているイソプレノイドやアルカンなどによるバイオ燃料は、生物を利用して生成することも可能となる。代謝経路を生物に移入したり、細胞全体に及ぼす影響を観察して、その結果を次の育種につなげていく。作りながら学び、生物を改良していく手法を、広い意味で合成生物学と呼びたい。『ネイチャー』には、酵素を導入して、オクタン価の高いイソブタノールのような燃料をつくる技術なども報告されている。

次世代のバイオ燃料技術を考えると、統合バイオプロセス(CBP)によりつくられた微生物を用いてバイオエタノールを生成する技術の開発が大きな目標となる。また次々世代では、イソプレノイドやアルカンなどを強力につくりだす微生物を、代謝系やメタゲノムなどいろいろの手法を駆使して開発することが大きな目標となる。また、例えば酵母だと 1 グラムの炭素から 0.5 グラムぐらいのエタノールしかできないが、酵母を改良して、0.8 グラムつくらせるといった技術の開発も課題となる。

微生物に、セルロースからより効率的にエタノールをつくらせようとする場合、通常は代謝経路を入れ換えるためにプラスミドなどの遺伝子系を導入する。目的の物質を十分に生産できれば、あとは大量生産をすればよい。しかし現実的には、そうならない場合が多い。そのため、転写産物、タンパク質、代謝物などの機構を体系的に理解しながら、フラックス解析などを行ってモデルを構築し、そのモデルに基づいてさらに代謝経路の改良を行っていくシステムづくりが求められる。これを合成生物学的アプローチと呼んでいる。基盤的手法を確立し、次々世代のバイオ燃料をつくりだすスーパー微生物の開発を目指している。細胞全体でトランスクリプトーム、代謝プロファイリングなど、様々なレベルを理解しながら、システム的に進めていく必要がある。

質量分析計(MS、Mass Spectrometer)を利用することで、多種の微生物に対して代謝プロファイリングを行うことが可能となっている。トランスクリプトーム解析でも、例えば微生物にエタノール耐性をつけるため、エタノールを付与して遺伝子に生じた影響をクラスタリングして転写

[1]

因子の絞り込みをするといった方法が考えられる。

システム全体を見た後に絞り込みをするには、炭素 13 で標識した化合物を培養地に取り込ませ、代謝の変化を質量分析計で解析し、レート限界がどこかを同定していく。こうした作業を行うために、インシリコで代謝変動などを予測し、次の改変に結びつけていくことが求められる。システムバイオロジーやフラックス解析に基づいたデータでゲノムスケールのモデルをつくり、さらなる育種に活かしていくといった点が重要である。「合成生物工学」の観点から、次世代の競争力ある育種を行っていく必要があると考えている。

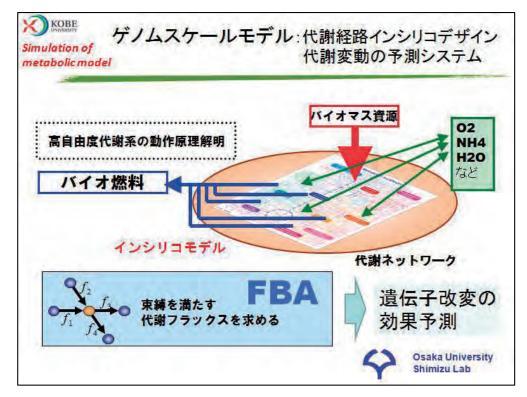


図-10 ゲノムスケールモデル:代謝経路インシリコデザイン 代謝変動 の予測システム

●質疑・討論 遺伝子組み換えの効果予測

Q インシリコで代謝フラックスを予測することは重要と考えているが、現時点の方法としては、組み換え後の分析を積み重ねるしかないか。

A 遺伝子組み換えの効果を予測することは、今後の課題である。定常状態では解析ができるが、非定常状態では解析が難しい。ただし、日本でも開発に取り組んでいる研究チームが 2、3 はある。システムバイオロジーやフラックス解析と合わせることで、競争力が高まることを望みたい。

●質疑・討論 細胞全体にわたる代謝系の理解

Q ある一つの部分が変わるとすべてが変わるといった系では、細胞全体の代謝系を把握する必要があるように思える。いつごろ実現できると考えているか。

A 細胞全体にわたって代謝系などを理解するのは難しい。しかし、すべてを理解しなければならないわけではない。フラックス解析などを駆使して、対象の絞り込みを行い、ボトルネックの部分の酵素を改変すればよい。最近ではメタボライトの解析技術や、トランスクリプトームの解析技術も進歩しているので、それらを統合しながら研究をする時期にさしかかっている。また、世界的競争力のあるスーパー微生物を育種するには、人材育成や未解決問題の解決なども必要となる。

●質疑・討論 キシロース発酵の合成生物学的解析

Q 10 年ほど前から、キシロース発酵は代謝経路の酸化還元バランスなどの問題からうまく行われないことが指摘されてきた。合成生物学的な手法での解析は行われていないのか。

A キシロースが代謝しているときに予想外の物質が蓄積されていることが発見されるなどしている。蓄積があるということは、何かが溜まっていることになる。次にそれを先に流すような育種をしてみるといった段階につながる。そういうデータに基づいて次の戦略が立てられる。

3.6 クローズド発酵サイクルの重要研究課題 福崎英一郎 (大阪大学)

まず、これまでの講演の内容に関連することを述べる。

(柴田大輔部長「最新メタボローム解析技術と今後の開発課題」に関連して)ゲノムの理解を考えた上でメタボローム解析を考えると、トップダウン的手法しか道はない。地道なアノテーションの作業が必要になる。

(近藤昭彦教授「合成生物学の重要研究課題」に関連して)ゲノムをすべて理解できなくとも、経験から人工的に組み換えなどを行うことができる。 ただし、予想どおりの結果が得られない場合もあるので、その際はメタボローム解析を部分的に適用させることができる。

本題の「発酵生産」に関して話したい。

発酵生産には「回分培養」「流加培養」「連続培養」などの培地添加タイミングによる分類や、「静置培養」「通気培養」「攪拌培養」「振とう培養」などの撹乱法による分類、また「純粋培養」、「混合培養」といった純度による分類がある。バイオ燃料生産に用いる方法は流加培養や連続培養、また通気培養や攪拌培養、混合培養となる。統合バイオプロセス(CBP、Consolidated BioProcessing)では混合培養となる。

発酵プロセスの特徴は、前処理、変換率、発酵速度、消費動力、後処理などに分類することができる。

前処理では、発酵原料の品質が一定でない点が問題としてある。ソフトバイオマスや生ゴミに発酵阻害物質が混入している場合、発酵が進まなくなってしまう。バイオリファイナリーを発酵可能な形にするための必要最小限の処理システムの検討が課題解決のため重要となる。

変換率に関しては、どの程度の変換率だとコストパフォーマンスが最高 になるかを探ることが重要である。バイオリファイナリーから生産される バイオ燃料収率をできるかぎり化学量論量に近づけることが求められる。

後処理も、重要であり課題もある。持続可能なシステムとするには、通常の廃液処理をしていては意味をなさない。閉鎖系の循環システムを考える必要がある。完全に浄化しなくとも、発酵阻害物のみを取り除くだけで、次工程で一括処理するといった方法が閉鎖系では重要になる。発酵残渣や発酵廃液を一括処理の仕込みに用いるための最小限の処理プロセスを考えるべきである。

統合バイオプロセス(CBP)による発酵にも課題はある。とくにソフトバイオマスでは、処理工程でのC5代謝経路、C5代謝とC6代謝の効率的混合処理、阻害物質の耐性、酵母の繰り返し利用といった点が検討すべき点となっている。

これらの問題点を解決するため人工的な処理を加えるが、解決されない 点もある。そこで、メタボローム解析を利用することになる。具体的な方 法を紹介したい。

キシロースは、特定の酵母でしかエタノール発酵をしない。代謝経路を たどると、キシルロースの段階まで行けばペントースリン酸経路を経由し て発酵されうる。キシロースをキシルロースにする最も簡単な方法は、キ シロースを還元してキシリトールにしてから再酸化することである。そこ で、この過程を進めさせるため、キシロース・リラクターゼ、キシリトー ル・デヒドロゲナーゼ、キシルロキナーゼの各遺伝子を導入することにな る。

ところが、この手法では予想外にも S7P(セドヘプツロース・クリー

ン酸)が異常に蓄積されることがわかった

ン酸)が異常に蓄積されることがわかった。これにより、メタボローム解析で可能なかぎり広範に状況を観察し、どの過程に原因があるかを解明することができる。そこで純化処理を行った結果、S7Pの蓄積は抑えることができた。

しかしその結果、キシリトールが細胞外に大量に分泌することになった。 経路の平衡をずらしたり、バイパスを通したりして調節をすることになった。 た。

メタボローム解析で有意義な点は、これらの課題を抽出できることにある。 メタボロミクスは人工的な発酵システムを最適化するときのナビゲーターとなる。遺伝子改変をしても望ましい結果が得られないときは、メタボローム解析で確認し、再び改変を同時に複数行えばよい。メタボローム解析はまた、バイオリファイナリーの混合物や発酵廃液から発酵阻害物質を検索するときにも有効となる。

メタボローム解析を実践的に行える技術者が求められている。現在、人材を輩出する機能は皆無に等しい。人材をつくりあげるしくみも考えていかなければならない。

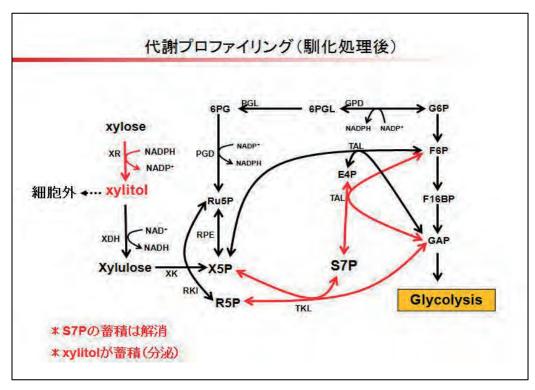


図-11 Future Work (代謝プロファイリング)

メタボロミクスは、発酵システム最適化のナビゲーター

- ・機能増強を志向した遺伝子改変戦略は、多くの場合、遺伝子は発現する が、期待した代謝改変が達成されない場合が多い。
- ・メタボロミクスによって、第2の代謝遺伝子改変戦略を立案する.



図-12 メタボロミクスは、発酵システム最適化のナビゲーター

●質疑・討論 メタボローム解析の実用性

Q 技術や材料が揃っていて人的投入をすれば実用できる段階なのか。それともまだ技術開発が必要な段階なのか。

A どちらともいえる。例えば、コンピュータ・シミュレーションはすでに構築されている。しかし、CV 値に関する分析精度を向上させるといった課題がある。メタボローム・コントロール・アナリシスでグレゴリ・ステファノポーラスの古典的な式を使うためには、精度の高い実験値が必要になる。データベースをリソースとして技術の質を高めることも不可欠である。ただし、メタボローム解析を駆使すれば、タンパク質工学や遺伝子組み換えの問題を記述して示すことが可能となる。

●質疑・討論 次々世代の中心的課題

Q 対処療法的でなく、デザインされた代謝系を組み込んでいく方向には 克服すべき課題が多い感がある。次々世代の大きな課題となるのではない か。

A そう考えている。バイオ燃料を生成する場合は、セントラル・メタボ リズムを制御することになる。微妙な部分の対処療法的な調整も必要であ るが、次世代と次々世代の課題にバランスよく取り組んでいかなければならない。

●質疑・討論 分解経路における化合物の入手と用意

Q キシロースの分解経路は重要である。経路における各化合物は合成されたものを入手することができるのか。実用面を考えると、化合物をすべて揃えておくことが必要ではないか。

A 合成は可能であるが、すべてが販売されているわけではない。(化合物を揃えておく点に関しては) そのとおりである。自分で合成するなりしてカタログ化し、観測に用いるといったことも考えるべきだろう。なお、プロテオームも重要で、プロテオームは終わった技術開発ではないことを提言する必要がある。

●質疑・討論 メタボローム解析をする"場所"

A 真核生物を扱っていると、細胞内の局在性の問題が生じる。また、原核細胞は、代謝産物を細胞外に出してしまう。メタボローム解析では、解析する"場所"に関する問題は検討がなされているのか。

A 細胞器官に特化した代謝物解析は重要だが、技術的には未成熟である。 液胞や葉緑体に対しては代謝物解析が始まっているが、ペルオキシソーム とかミトコンドリアなどの重要な器官に対しては代謝物分析技術が確立 されていない。解決すべき課題である。また、原核細胞に関しても、代謝 産物を外側に分泌するため扱いが困難である。細胞内の"フィンガープリ ント"と細胞外の"フットプリント"を同時に解析することが重要である。

3.7 セッション I のまとめ 柳下立夫(産業技術総合研究所)

1番目の講演は「次世代セルラーゼの開発 (NEDO での取組を含む)」 (森川康教授) だった。米国のセルロースからのバイオエタノール生産に 400 億円の補助が出ており、基礎研究への投資が活発である。木質バイオマスはセルロース、ヘミセルロース、リグニンからなる複雑な構造をもっており、セルロースが結晶構造をもつ点が特徴である。セルラーゼ生産菌は、糸状菌が用いられる。セルラーゼ研究者の連携や統一的評価が重要である。植物細胞壁の構造解析も重要で、セルラーゼとの相互作用が糖化

に関して重要なキーワードとなっている。糖化以前の前処理技術の開発も重要であり、前処理と酵素糖化との関連性を調べる点も重要となる。実際の実施例として三井造船、大成建設がある。大成建設でヘミセルロースからのエタノール生産が行われており、2008 年夏からセルロースの酵素糖化の検討が行われる。バイオ燃料技術革新計画が設定され、バイオ燃料技術革新協議会が設立されている。次々世代としては、セルロソームの利用が考えられる。今後の課題は、セルロソームの発現(誘導)技術、セルロースの分解機構の解明、分解システムの活用、それらの糸状菌への応用などとなる。

2番目の講演は「バイオリファイナリーに向けてのリグニン生分解系解析と分解触媒開発の重要性」(渡辺隆司教授)だった。リグニンの年間生産量はセルロースに次いで多く、豊富な有機化合物である。バイオ燃料生産とリグニンの化学資源化のリンクにより、バイオ燃料におけるコストパフォーマンスの向上が図れる。現在の石油リファイナリーから生物由来のバイオリファイナリーに向けて体系に変化があり、ビジネスチャンスもある。また、科学的な技術の開発が必要である。芳香族のバイオリファイナリーは未着手状態で、大規模産業化への道がある。白色腐朽菌が、糖化前処理からリグニンの資源化に使われている。リグニン分解酵素の働きは、ほぼ解明されていて、非選択的及び選択的な分解が行われている。リグニン分解酵素の反応場の制御と反応特異性の制御が重要であり、リグニン分解に関与するラジカル種の解析なども課題である。開発中の技術として、マイクロ波反応、そして次々世代としては金属結合型ペプチド超分子ゲル触媒などが考えられている。

3番目の講演は、「バイオマス全てを有効利用するための革新技術」(松村幸彦教授)だった。超臨界水、また、それよりも温度・圧力が低い亜臨界水の利用がある。それぞれバイオマスの炭化、油化、ガス化、成分分離などに使われている。水熱なので含水バイオマスへの適用に非常にすぐれており、また、超臨界水は水と水蒸気の中間性質を持っていて、反応性が高く環境にもよい。反応速度が非常に速い。熱回収が重要である。コストに関しては、廃棄物を対象とすれば経済性があると試算されている。実施例として、ドイツでは1時間あたり100kgの処理量が報告されている。米国や広島大学にもプラントができている。

4番目の講演は、「最新メタボローム解析技術と今後の開発課題」(柴田大輔部長)だった。ゲノム解析はほぼ確立されつつある。タンパク質や生体反応の解析がまだで、メタボロミクスに関しては複雑すぎてまだ十分解明されていない。メタボロミクスに関しては、20万種類以上の化合物が

関与していて、多様性の理解が必要である。アノテーションというキーワードがある。解析が難しく、代謝産物データベースの構築が必要である。 FT-MSの利用により分子式が決定され、これにより得られる情報が重要となる。解析の自動化が課題となっている。全生物の代謝情報の集約が可能になりつつある。実際に海藻のメタボローム解析も行われている。研究者のデータベースへの理解が不十分である。アノテーション作業の進行、人材養成等が課題となっている。

5番目の講演は、「合成生物学の重要研究課題」(近藤昭彦教授)だった。 微生物の育種の過程で、ダイナミックに機能を改変させ、システム的な微生物の育種の確立を目指す。目的に合わせて生物種を超えて大胆に生物種を改変し、スーパー微生物を作りだす。ただし新機能を導入すると微生物種への影響がある。代謝経路を移しかえたり、微生物の影響を検討したりして、さらなる有用株への育種を目指す。生物の限界を超えての育種が目標となる。解析手法としては生物学的プロファイリング、最大レート限界の同定などがある。細胞レベルでの解析、代謝経路、特定反応、システマティックな解析・改良を行う。また、ゲノムスケールモデル、代謝経路インシリコデザイン代謝変動の予測システムもある。合成生物工学というテーマが挙げられた。

6番目の講演は、「クローズド発酵サイクルの重要研究課題」(福崎英一郎教授)だった。発酵サイクルにおける前処理として、原料の品質が一定でなく発酵阻害物質の混入危険があり、必要最小限の処理が必要である。最重要課題としては、コストよりも変換率であり、理論収率にどれだけ近づけられるかという課題がある。後処理は重要課題として、通常の廃液処理ではなくクローズド廃液処理、最小限の処理を目指す。その中でメタボローム解析を取り込み、キシロースの処理の解析で中間代謝物の蓄積の判明、そして最適化の戦略の構築などを行う。メタボローム解析は発酵システムの最適化ナビゲーターである。発酵阻害物質の探索戦術、変換率向上・発酵速度向上のナビゲーターとして使えそうである。

3.8 セッション I 総合討論

●質疑・討論 超臨界処理に関する法規制

Q 超臨界流体を大規模運転する際、日本の圧力容器関連の法律が厳しい ため、コスト面での制約となっていると聞いたことがある。いまも制約は あるのか。

[1]

A 高圧ガス保安法が適用される。法律が厳しすぎる点もある。今後、超 臨界技術の実用化に向けて、法律を緩められる部分は緩めてもらうよう、 お願いしていくことはありうる。

●質疑・討論 塩水の超臨界処理

Q 塩水の超臨界処理は難しいという。塩が含まれている容器の材料的な問題からなのか、原理的な問題があるからなのか。

A 原理的な問題である。超臨界は水蒸気の状態に近い。塩は水に溶ける ものの、水蒸気には溶けない。超臨界になった瞬間に、塩が一斉に表出し て詰まってしまう問題を解決しなければいけない。

●質疑・討論 研究の拡散

Q ゲノミクス、プロテオミクス、メタボロミクスなどのオミクス研究は30年~40年前から進歩を遂げてきた。ただ、ある現象が解明されると、新たな未解明問題が生じる。解明する対象を絞っても、研究の問題点が発散していくということはないか。

A 逆だと考えている。オミクス研究では、ゲノム解読、RNAのしくみ、タンパク質や代謝のしくみなどの生物的要素をすべて調べつくす発想があるからである。取り組んでいる研究は発散するものでなく統合するものだと捉えている。すべての情報を統合して、生物として対象を理解しようとしている。ただし、統合は極めて難しいものでもある。情報をどのように解析するかが問われる。戦略的に研究を一定方向に進めるにはリソースを決める必要がある。一つの生物の一つの遺伝子を操作したとき、遺伝子、RNA、代謝などの影響をすべて把握してリソースをつくり、それを基に議論をする。そうすることで研究の方向性は決まっていく。大学の研究者は、自分の興味本位で研究を行うところに問題がある。リソースを考えたうえで国がファンディングするという基盤がある中で、研究者が自由に研究をするのはよい。その基盤がないと、研究が拡散してしまう。

A 観察機器の精度を高めるための技術開発は必要であるが、すべての技術が揃わないと何もできないというわけではない。理学や生理学、微生物学の分野などでは好奇心先行で研究が進む傾向が強いが、社会ニーズに応える工学の分野では、技術主導で研究が進む。

A 例えば、すべての代謝経路までは解らないとしても、見る範囲を広げ

ることにより、予想していなかったしくみが見えてくる場合もある。蓄積 されてきた分析情報を、生物を開発したり、育種をしたりするために応用 する段階に入ったと考えている。

●質疑・討論 仮説の説明

Q 藻類の利用に関して、開発の障壁となっているものは何か。障壁を乗り越えるにはどのような技術が必要なのか。その課題を、セッション I で提示されている「陸生微小生物を活用するバイオ燃料生産の可能性」の各仮説ができた経緯に照らし合わせて説明してほしい。

A 仮説①「糖化・発酵プロセスとして廃棄物を最小限にするクローズドシステムが確立する」は、バイオマス利用に際して、残渣が発生すると環境負荷が高くなるため、この問題を含めて利用できるシステムが必要だと考えて立てた仮説である。仮説②「次世代セルラーゼの大量生産が可能になる」は、セルロソームなどのセルラーゼ集合体ができれば、効率的なバイオマス変換が実現するのではと考えて立てた仮説である。仮説③「バイオマス資源の 100%有効利用が可能になる」は、バイオマス燃料や、バイオ材料などの原料となるものを、すべて利用できることが望ましいと考えて立てた仮説である。仮説④「他分野で使用されているメタゲノム、メタボロミクス、メタボローム等の解析法の適用が本格研究開発に導入される」は、新しい機能を微生物にもたせるには、これらの技術が必要ではないかと考えて立てた仮説である。

●質疑・討論 メタボロミクスの可能性と将来的展望

Q メタボロミクスの技術が別の世界で一番成功を収めている分野はどのようなものがあるか。メタボロミクスでは、どの程度まで成功すれば、 先端技術といえるのか。メタボロミクスを使って何ができるのか。

A メタボロミクスを行う背景として、多様性を生物から学ぶという認識がある。生物がもつ基本的なモデルの表現形態を「デフォルメ」と呼んでいるが、その背景には遺伝子や代謝物のシステムがある。そのシステムを自然界から学べば、そこから見えてくるものが生まれる。例えば、医薬品の半分は天然植物由来であり、自然界から学んでいけば医薬品開発の道が開けていく。たまたま存在する生物を用いてバイオエタノールを作る手法はリスクが高すぎる。全体をザーッと見てしまうことでメタボロミクスが貢献できる部分がある。

[1]

Q バイオ燃料を作るところに標的があるのであれば、現在ある化学や生物学の成果を寄せ集めて、利用できる部分はすべて利用し、未解決の部分を解決していくといった方法が最も近道なのではないか。超臨界処理の問題でも、塩分を効率よく除去する方法をまず考えるのが近道ではないか。

A 機能的なセルラーゼを開発するといった現実的アプローチをしながら、細胞全体のしくみを理解していくアプローチも並行していくという方法が、現在の最も基本的な研究の流れであると理解していただきたい。

A メタボロミクスの実用化に関して、ゲノムから設計図をすべて解析して合理的に何かを測定するといったことは実現していない。これは次々世代にわたる長期的視野に立って取り組まなければならない課題である。ただし、メタボローム解析で、正確なフラックスを完全には把握できないにしても、いま提示されている複数の仮説に対して優先順位を付けることはできる。試行錯誤しながら研究を進めるとき、成功へと導く確率を高めるという点では、メタボローム解析は実際に役立てられている。半合理的な測定方法の確立をメタボロミクスの次世代の課題とし、完全に合理的な方法の確立を次々世代の課題として、短期的研究と長期的研究を並行させながら行っていけばよいと考えている。

●質疑・討論 2030 年を見すえた技術展望

- C 今回のワークショップは、2030年ごろの技術のあり方を標的にしている。2030年の時点でこの分野の進捗があまりなければ、日本は国際的に後塵を拝することになる。そうならないための提言をいただきたい。
- C 当センターからプロポーザルを出す際は、技術全般を俯瞰して、どのような技術があるかを抽出し、それらに優先順位を付けていく手順となる。 分野的融合が進まない状況をどう打破していくかという問題は常にある。 専門家にしかできないような指摘をぜひこの場でしていただきたい。

●質疑・討論 オミクス研究の問題点と意義

C ファンディングの多さに比べて成果が少ない点が、オミクス研究の問題点ではないか。オミクスは広範な基盤技術であって、バイオマス利用などのように研究目的が明確になっている分野にオミクスを利用していく必要があるのかといった議論がある。米国のファンディング方法を見ると、バイオマス利用などの研究の潮流にあわせ、将来的に重要と思われる分野には、重点的に投資がなされている。科学技術振興機構のような機関が責

任をもってファンディングの配分を決めていくことが求められているのではないか。

- Q バイオ燃料を作るための原料として決まっているものに対しては、今後、安定した酵素を合わせる複合酵素系の開発を進めていくこともできるのではないか。2030 年のイメージをするとき、そのような方法とオミクス技術を開発していく方法の両面がある気がする。
- C メタボロミクスの利用に関する議論は、酵母発酵やエタノール生産に限定したものと理解している。糖化やセルラーゼの話は含んでいないと解釈している。少なくともエタノール生産に関しては、メタボロミクスは非常に重要な技術となるので、日本は全部理解をするといった姿勢で研究を進めるべきではないか。

A まず、安定した分解力をもつ優れた酵素を作ることが必要となる。次の段階として、微生物に高性能な酵素を作らせたり、植物に酵素を作らせたりといったことも考えられる。技術の複合化、統合化が次世代には必要になってくる。バイオエタノール燃料生成の実用化では、微生物の代謝経路などを制御して、燃料の収率を確実に高めることが必要となる。オミクス全体を統合させながら、生物を設計する手法を編み出していかなければならない。目的の収率を、コストに見合う条件で得るためには、基盤技術を推進していくことが重要となる。

●質疑・討論 メタボローム解析の意義

C 前処理などで溶液中の分解阻害物質が何であるかを同定するときや、 リグニンの複雑な構造をモデル化する場合などでは、メタボローム解析は 重要となるだろう。様々な分野に応用できるのではないか。

●質疑・討論 セッション I の感想

C 優秀な酵素を作るろうとするとき、出発原料をバイオマスにすると、木材にセルラーゼやリグニンなどの分解酵素だけ加えてリアクターで処理しても工程が進まない。そこで前処理をするとき、いかに酵素が基質を攻撃する状態にするかが鍵となる。化学的、物理学的、生物学な方法などが考えられるが、しくみの理解が基本的に重要となる。メタボロミクスに関しては、生物を統合的に理解することが重要だという考えは世界的な見解となっている。その中で日本の独自性とか強みをどのように生かしてい

くかが問われる。地道な作業を重ねて、リソースを構築していくことが重要である。また、インシリコの数学的予測も駆使して、最適解に最短で到達するための方法を考えていくことが最も重要となるだろう。

3.9 「セッション I 陸生微小生物を活用するバイオ燃料生産の可能性」の記録

本ワークショップにおいては、各セッションでのプレゼンテーション、 質疑応答、さらに討論の要点を柳下立夫氏(産総研)が逐次記録し、必 要に応じてコーディネータ等が参照できるようにするとともに、各セッ ションの最後に参加者全員に提示することによって、WSで交換された 情報・意見を確認し、さらなる討議にも資するようにした。

以下に、本セッションI「陸生微小生物を活用するバイオ燃料生産の可能性」に関するその記録内容をまとめて記す。

第1講演者 森川康(長岡技大)次世代セルラーゼの開発

- 〇米国セルロースからのバイオエタノール生産 400 億円補助 基礎 研究への投資
- ○木質バイオマス: セルロース·ヘミセルロース・リグニンからなる複雑 な構造 セルロースが結晶構造を持つ
- ○セルラーゼ生産菌→糸状菌 セルラーゼ研究者の共同・統一的評価が 課題
- ○植物細胞壁:構造解析が重要 セルラーゼとの相互作用
- ○前処理技術の開発:前処理と酵素糖化との関連性
- ○実施例:三井造船、大成建設(ヘミセルロースからのエタノールの生産 今夏からセルロースの酵素糖化検討)
- ○バイオ燃料技術革新計画の策定 バイオ燃料技術革新協議会の設立
- ○次世代:セルロースを別個に分泌→次々世代セルロソーム(種々のセルロースをパッケージされている)
- ○今後の課題:発現(誘導)制御 セルロースの分解機構の解明 分解システムの活用 糸状菌への応用

質疑

- ・アーミング酵母は?
 - →限られた条件では良好。

・嫌気製バクテリアで発現 生理的な意義・制約 →分解機構の解明を通して工学的な利用

第 2 講演者 渡辺隆司(京大)バイオリファイナリーに向けてのリグニン生分解系解析と分解触媒開発の重要性

- 〇リグニン: 年間生産量はセルロースについで多い 豊富な有機化合物 バイオ燃料生産とリグニンの化学資源化のリンクによりコストパフォーマンスの向上
- ○石油リファイナリー→バイオリファイナリー 体系の大きな変化
- 〇アロマティックバイオリファイナリーは手付かず ビッグインダス トリーへの道
- ○白色腐朽菌:糖化前処理で利用→リグニンの資源化も可能
- ○リグニン分解酵素の働きはほぼ解明 非選択的(細胞壁の分解→分解)と選択的(直接分解)
- ○反応場の制御と反応特異性の制御:特に、リグニン分解に関与するラジカル種の解析
- 〇開発中の技術:マイクロ波反応 金属結合型ペプチド超分子ゲル触媒

質疑

- ・バイオリファイナリーとして白色腐朽菌のリグニンの分解後の生成物 利用
 - →ダイレクトにはなかなか使えない。
- ・現在の廃リグニン化合物の利用
 - →燃焼によるエネルギー回収 黒液からの資源回収は難しい
- ・反応速度とコスト
 - →ソルボリシス:5分 マイクロ波反応:30分
- ・次々世代の開発は
 - →反応場の制御 金属結合型ペプチド超分子ゲル触媒の開発 有益 なアロマティック化合物への資源化が課題
- ・ラジカルの種類
 - →ヒドロキシラジカルが主要な役割を果たしている

第3講演者 松村幸彦(広大)バイオマス全てを有効利用するための革新技術

○水熱技術:超臨界水・亜臨界水 →炭化・油化・ガス化・成分分離が 可能

- ○含水バイオマスへの適用
- 〇超臨界水:水と水蒸気の中間性質 反応性が高い 環境性にもよい
- ○反応速度が速い
- ○熱回収が重要
- ○コスト:廃棄物を対象とすれば経済性がある
- 〇実施例:ドイツ 100 kg/h の処理量 米国 広島大学 1t/d

質疑

- ・規模はどれぐらいか
 - →1 プラントは 10 t/d が限界か
- ・熱回収すれば経済性は?
 - →廃棄物であればペイする 鶏糞は厳しい
- ・エネルギー収支
 - →超臨界は熱回収が重要 低温水熱では熱回収は重要ではない 如何に全体のシステムを作るかが重要
- ・海水を使った場合は塩の問題
 - →難しい その場合は脱塩技術が課題か
- ・鶏糞を原料とした場合の処理液の色は?
 - →水と見分けつかない 着色の問題はない
- ・ 反応物は? 反応物の制御は?
 - →超臨界水ガス化では化学平衡計算で予測 それ以外の水熱反応は 種々雑多な生成物ができる
- ·LCA 的な考察は
 - →すでに行っており、CO₂削減効果がある
- ・ミネラルの問題
 - →N: 水溶液 P: ヒドロキシアパタイトとして回収できる

第 4 講演者 柴田大輔(かずさ DNA 研究所) 最新メタボローム解析技術と今後の開発課題

- 〇ボストゲノムサイエンス: ゲノム解析が確立されてきている タンパク質・生体反応の解析がまだ メタボロミクス: 複雑すぎてよく分からない
- 〇メタボロミクス:20万種類以上の化合物が関与 多様性の理解が必要
- ○アノテーション(関連する情報を注釈)がキーワード
- ○解析が難しい 代謝産物データベースの構築が課題

- ○一般に、構造、分子式が分からない→FT-MS の利点:分子式が決まる
- OMS/MS 情報が重要
- ○解析の自動化が直近の課題
- ○全生物の代謝情報の集約が可能
- ○海藻のメタボロ解析にも着手
- 〇研究者のデータベースへの理解が不十分 アノテーション作業の進行 人材養成

質疑

- ・対象の解析と機能の関連性
 - →何がどう動いたかの情報統合が重要 関連付けの地道な作業が必要
- ・遺伝子組換生物の自然界への影響予測が可能か →全体のインターアクションが不明
- ・バイオリファイナリーの確立においてメタボローム解析が重要では?→全てのフラックスの解析は困難

第5講演者 近藤昭彦(神戸大)合成生物学の重要研究課題

- 〇微生物の育種の過程で、ダイナミックに機能改変 システム的な微生物の育種の確立
- 〇シンセティックバイオロジー:目的に合わせ、生物種を超えて大胆に 生物種を改変
- 〇スーパー微生物:新機能を導入すると微生物種への影響がある
- ○代謝経路を移し変え、微生物の影響を検討し、さらなる有用株への育 種へ
- ○生物の限界を超えての育種がゴール
- O解析手法: Biological profiling Identification of rate-limiting factor
- ○細胞レベル→代謝経路→特定反応 システマチックに解析・改良
- 〇ゲノムスケールモデル 代謝経路インシリコデザイン代謝変動の予 測システム
- ○

 ○

 合成生物工学

質疑

・組み替えた後の分析がキーポイントでは?

- →最適化問題を解く手法がこれからの課題
- ・技術レベルと実用化のイメージは?
 - →全てを知るのは困難 絞り込むことにより、容易になる いろいろ な情報、分析の統合が非常に重要 国際的な競争力の向上
- ・キシロース等のエタノール発酵の酸化還元情報が重要であるが、このような情報が得られるか?
 - →メタボローム等の解析で明確に見えてくる場合があり、次の戦略へ つながる

第 6 講演者 福崎英一郎(阪大)クローズド発酵サイクルの重要研究 課題

- 〇前処理: 原料の品質が一定でない 発酵阻害物質の混入危険 必要最 小限の処理
- 〇最重要課題:コストよりも変換率重視 理論収率に近づける
- ○重要課題:後処理 通常の廃液処理ではなくクローズド廃液処理 最 小限の処理
- ○メタボローム解析: C6、C5 処理においてキシロースの処理の解析で中間代謝物の蓄積の判明 最適化の戦略の構築→メタボローム解析は発酵システムの最適化ナビゲーター
- 〇発酵阻害物質の探索戦術 変換率向上・発酵速度向上のナビゲーター

質疑

- ・技術実用化への課題
- →データベースの構築と分析精度の向上 局所的な分析としては容認できるのでは
- ・ミニマムゲノム等のデザイン化がテーマでは?
 - →バイオ燃料に関しては対処療法的な対応が必要では
- ・中間代謝物のスタンダード物質は?
 - →予算があれば網羅したい
- ・真核生物での局在性に関しては?
 - →真核生物では難しい

討論・セッションIまとめ

- ・圧力容器に関する規制
 - →高圧ガス保安法 実用化に向けての規制緩和があるかもしれない
- ・超臨界水における塩水 容器的な問題か

- →原理的な問題 超臨界水には塩が溶解しない
- ・ゲノミクス、プロテオミクス、メタボロミクス 問題点が逐次的に発 散する可能性
 - →逆であろう。要素還元論→統合へ 情報の解析
 - →精度を上げる技術開発はある。
 - →見る範囲を広げると 解析→生物の育種への応用へのステージ
- ・見ていく必要のある範囲の拡大
 - →方向性の確立 リソース (ベース) の確立の必要性
- ・仮説の背景に対して、これまでの発表技術の課題は
- ・メタボロミクスの成功例 多様性の学習 自然界から学ぶ
- ・バイオ燃料を作るには化学・生物的な技術を総動員して利用、残りをどのようにするか
- ・次々世代をターゲットとしているので、仮説に対してメタボロミクス の適応可能性を議論するべきでは
- ・現状でもメタボロミクスを利用したスナップショットでの情報提供は 可能 セルの全体的な解明は次々世代において
- ・全体・俯瞰的な観点からの課題の抽出、優先度をつけて欲しい
- ・米国のように、ターゲットに付随してより大きな視野を持ったファインディングも必要では
- ・次々世代の技術はシステムの複合化・統合化へ行くのでは? 基盤技術の改良
- ・メタボローム解析の応用を視野
- ・リソースの開発 それを用いた応用

4. セッション II 水生微小生物(微細藻類)を活用する バイオ燃料生産の可能性

4.1 具体的な藻類利用技術開発概論

原山重明(中央大学)

水生微小生物(微細藻類)を活用するバイオ燃料生産を提案するに至った経緯・背景は二点ある。

一点目は、所属している製品評価技術基盤機構において関口弘志氏(元・海洋バイオテクノロジー研究所)が、軽油を生産する藻類を発見したことである。この藻類は、温泉から発見されたもので、窒素が欠乏するとハイドロフォビックなグラニュールを発生させていた(図-13)。また、ガスクロマトグラフ質量分析(GC-MS、Gas chromatography-mass spectrometry)で計測すると、二重結合 1 か所の $C_{17}H_{34}$ 、二重結合なしの $C_{17}H_{36}$ 、二重結合位置不明の $C_{20}H_{38}$ などのアルカンの存在が発見された。分類的にはボトリオコッカスに非常に近いことが明らかとなり、仮名として「シュードコリシスティス」と命名した。

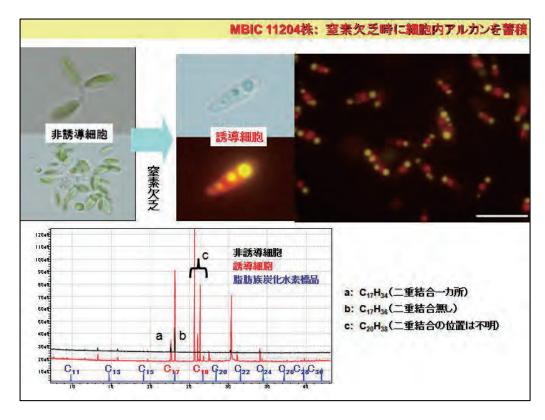


図-13 MBIC 11204 株: 窒素欠乏時に細胞内アルカンを蓄積

二点目は、二酸化炭素の削減努力がほぼ限界に達しているという点である。もともと省エネルギーを推進してきた上に、さらに二酸化炭素を削減することは難しい。二酸化炭素削減にはイノベーションが急務ではないかと考えた。

これらの背景を踏まえて、事業所から排出される二酸化炭素を、藻類によって吸収し軽油に変換する技術を開発する「ABC プロジェクト」を提案している。方程式で示すと「Algae (藻類) = Biofuel + CO_2 reduction」となる。

実行のためには、シュードコリシスティスによる軽油生産のための培養 条件とバイオリアクターの最適化(Architecture)、シュードコリシスティスの軽油生産能力のより増殖効率のよい藻類への移行 (Biotechnology)、新規石油生産藻類の探索・分離・保存・利用(Culture collection) などが必要となる。

釜石の海洋バイオテクノロジー研究所で、10年ほど前に実証研究施設を設置した。1日あたり1平米で50グラムの二酸化炭素を吸収した(図-14)。また、別に100メートル×70メートルほどの広さの実証サイトを建設した。バイオリアクターを集積させて二酸化炭素吸収量を、従来の4%に対して15%に引き上げていく計画である。また、軽油生産能力も従来の年8トンに対して年40トンに引き上げる予定である。

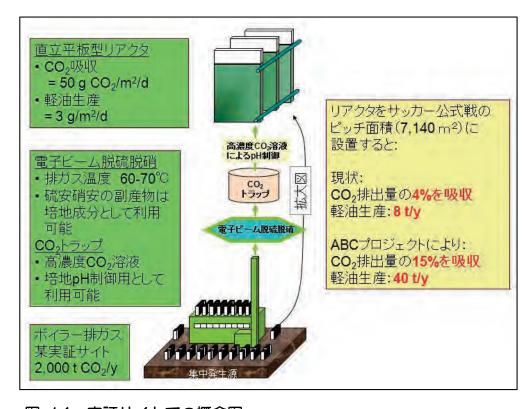


図-14 実証サイトでの概念図

[1]

具体的には、シュードコリシスティスの軽油生産能力を、より効率のよい藻類で行うことに移行するため、軽油生産経路の同定、ラン藻の最適化、軽油生産遺伝子のラン藻へのクローン化などを行う。推定される代謝経路では、二つの酵素が揃えればよいため、非現実的ではないと考えている。また、天然の藻類では、光捕獲クロロフィルの量が多すぎるため、それを減らしてバイオリアクターとして最適なものをつくることにも取り組んでいる。

次々世代に向けた研究開発に関して、採算に見合う価格は 1 リットル 40 円がぎりぎりのところではないかと考えている。次々世代の段階に進んでいくためには、さらなる工夫が必要となる。

●質疑・討論 微細藻類のエネルギー生産効率

Q 微細藻類のバイオ燃料の生産は、バイオマス液化(BTL、Biomass-to-Liquid)の観点から、どのように考えればよいか。

A 藻を乾燥させるために大量の熱が必要となる。バイオマス液化燃料で乾燥を必要とするものは、相当な熱量が消費されると考えている。なお、木質系バイオマスからのバイオマス液化では、エネルギー効率が 45~50%程となる。微細藻類のバイオ燃料では、油の分離の工程で相当のエネルギーを消費するだろう。

A 微細藻類のバイオ燃料生産にも当てはまることだろうが、エネルギー収支では、獲得するエネルギーは消費するエネルギーの3倍にもなる。 A 現状では、担当なコストがかかると考えている。シュードコリシステ

A 現状では、相当なコストがかかると考えている。シュードコリシスティスの軽油生産能力よりも効率のよい藻類を発見することが重要となる。

●質疑・討論 ナタネとの比較

Q ナタネからのバイオマス液化と比較して、どの程度のコストとなるか。

A 1 ヘクタールあたり年間 50 トンの油を生産する目標を立てている。 目標に向かって、ある程度のところまでは到達できると考えているが、コスト的には厳しいものがある。

●質疑・討論 研究成果の発表

Q 独自性のある開発で興味深い。研究成果は論文になっているのか。

A 論文にはまだしていない。2年前に、学会で発表をしている。

4.2 緑藻類からのバイオディーゼル生成技術と重要研究課題渡邉信(筑波大学)

藻類は 1 ヘクタールあたり年間 47~140 トンの燃料を生産することができる。一方、トウモロコシは年間 0.2 トン程度という報告があり、このことからも藻類の生産能力が非常に高いということがわかる。もし、米国で輸送に使われる燃料の半分を、米国の農地で賄おうとすると、トウモロコシの場合 958%の面積が必要となる。対して、藻類では 1~3%程度で済む計算になる。

ボトリオコッカスは、乾燥重量あたり 25%~75%の油を生産するとされていて個体差が大きい。淡水に生息し、10ミクロン程度の細胞が集まりコロニーを形成するのが特徴で、燃料としてケトン、エポキシド、シクロヘキサンなどを生産している。培養株により生成物も生成量も異なることが分かっている。

ボトリオコッカスの基礎研究の実用化に向けての要点として、次の四点を上げることができる。

一点目は、増殖及び炭化水素産生にすぐれた培養株の確保。二点目が、 高アルカリ領域で増殖する培養株の育種。三点目は光制約を解除できる培 養株の生成。四点目が、ライフサイクル・アセスメント評価である。

これまで、国内外でボトリオコッカス 144 株の無菌株を確立してきた 炭化水素量、増殖速度、増殖量、炭化水素産生量と種類、ペーハー増殖特 性を調査し、BOT88-2 は、炭化水素量 45.3%(乾燥時)、1 日の増殖 速度 0.158、BOT144 は炭化水素量 45.7%(同)、1 日の増殖速度 0.200 となった(図-15)。いずれも S130 と比較して炭化水素量と増 殖速度で優れている。この 2 種は、開発対象としてとくに期待が大きい。

光制御に関しては、BOT88-2 と BOT144 の特性を調べた結果、次の点がわかった。無機培地のみで光を照射し、光合成のみで培養株を増やすと、乾燥重量が 1 リットルあたり 2.5 グラム程度まで行くと光制限状態で頭打ちとなる。そこに、有機排水を 10%ほど添加すると 1 リットルあたり 8 グラム程度まで増加が伸びていく(図-16)。有機排水は自然界に流れるとメタンや二酸化炭素になるため、間接的に温室効果ガスを吸収していることになる。

また、液化天然ガス(LNG、Liquid Natural Gas)火力発電所近傍に 10 ヘクタール程度の培地を設置するという条件で、ライフサイクル・アセスメント(LCA、Life Cycle Assessment)評価を行った。二酸化炭素と熱供給は火力発電所経由とする。固液分離、燃料化、燃料燃焼、燃却 灰処分、さらに施設建設に至る全エネルギー量とコストを計算し、最終的に得られる獲得エネルギーと比較した。その結果、エネルギー獲得量は、年間 10.3×10⁷メガジュール、投入量は 3.48×10⁷メガジュールとなり、収支は正となった。二酸化炭素吸収量も、年間 7.45×10⁶キログラムで、排出量 2.49×10⁶キログラムを上回り、収支は正となった。しかし、コストは 1 億円程度の収入を得るのに、初期建設費を含め 3 億 7000万円程度がかかるため赤字となる。技術開発や低人件費化で解消できそうな差額であると考えている。エネルギー・ペイバック・タイムは 0.19 年となり、風力発電や太陽光発電と比較して同等か上回ることがわかった。バイオディーゼル燃料の 1 ヘクタールあたりの年産量と、リットルあたりの価格は、ボトリオコッカスが約 118 トンで 155 円、ナタネが約 1 トンで 500 円、パームが約 35 トンで 714 円、廃食用油が約 50 万トンで 72~87 円(回収費含まず)となる。ボトリオコッカスを燃料資源として技術開発する余地は十分あると判断した。

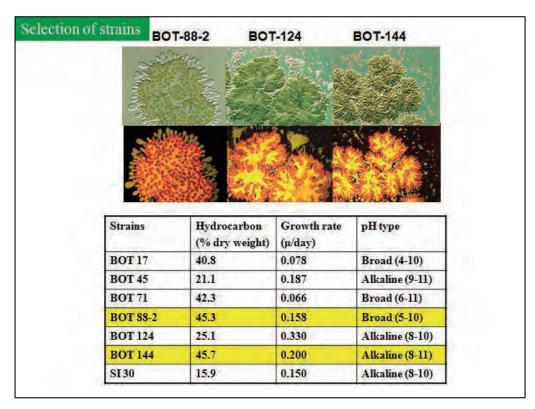


図-15 Selection of strains

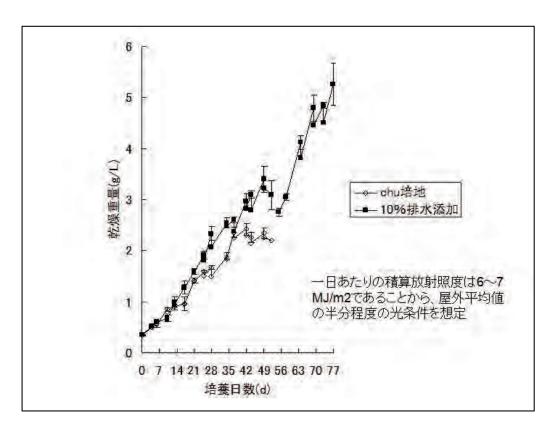


図-16 乾燥重量の変化

将来展望を述べたい。

一点目に、短期間に多様性を増やしていく必要がある。またカルチャーサンプルを供給するセンターを設立する必要もある。二点目に、野外での実証実験が挙げられる。屋外培地(オープン・ポンド)は安価かつ低エネルギーという利点があるが、生産性は低く他生物が混入する問題もある。屋内培地(クローズド・ポンド)は、生産性や制御性が高く混入問題もないが、費用が高くなるため大規模化しなければならない。三点目は、食糧問題も見据えたエネルギー確保のための品種改良である。四点目は、コスパフォーマンスを向上させるためのバイオリファイナリーという課題がある。

今後は第二フェーズの実用化基盤技術研究に取り組んでいくことになる。従来の研究グループに加え、産業界 6 社と共同研究契約が締結されており、2 社とも進行中である。国外の大使館、研究機関、産業界も参画する予定である。ただし産業界が投資するにはまだリスクが高い部分があるため、国の投資が重要な時期である。この時期を抜ければ、産業化へと進んでいくだろう。ここ5年、10年が勝負時といえる。

●質疑・討論 ボトリオコッカスの増殖率と生産性

Qボトリオコッカスを増殖させず、自然に油を生産させる方法も考えられる。 増殖率を向上させるのはなぜか。

A 油を多く作るボトリオコッカスは、増殖率が低い。増殖率が高いボトリオコッカスは油の生産性が低い。バランスのとれたものを生産する必要がある。ただしバクテリアに比べると増殖率は低いので、採算に見合う点まで増殖させた段階で、連続培養方式にする。現在のシステムでは効率は60%程度であり、ボトリオコッカスを増殖させながら油を取る、"生かさず殺さず"の方式をとっている。

●質疑・討論 光制限と有機物

Q 光制限があれば、有機排水を入れなくてもよい気がするが、有機排水を入れる意義は何か。

A ボトリオコッカスは光合成をすると、ある段階で従属栄養に切りかわる。有機物を取り込むと、有機物を利用して増殖する段階に切りかわる。この能力を活かせる環境設定をすれば、光制限は解除でき、収穫増が見込まれる。クロレラなども同じしくみをもっている。

●質疑・討論 菌株の比較

Q BOT88-2 や BOT144 などは、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) のプロジェクト時に扱われていた S133 に比べると効率がよい。菌株の優良性を判断するには、ある程度使ってみて検証することが必要になるか。

A いくつかの培養株がある。S130は効率が15~16%だった。但し、かなり強烈なエネルギーを投入した環境条件設定だった。今回紹介したBOT88-2やBOT144では、環境条件が異なるため、増殖率も光合成活性も低く出ている(条件が同じであれば優れた菌株となる)。様々な菌株で、比較を行っている。

●質疑・討論 培地の環境条件

Q ライフサイクル・アセスメントの紹介で 1 リットル 150 円と期待できる費用が示されていた。課題はバイオリアクターに用いる材料の点で費用が掛かることか。

A 今回のライフサイクル・アセスメントでは、屋外培養で行った。屋内

培養で行うと、1 リットルあたり 800 円ほどの値段となる。屋内培養に対しては、透明、安価、長寿命な材料を開発しなければならない。コストパフォーマンス向上のためにバイオリファイナリーを検討する必要がある。ボトリオコッカスへの注目度は高く、機構が解明されていけば屋外培養の可能性も否定はできない。

●質疑・討論 肥料の費用

Q 窒素、リン酸、カリウムなどの肥料の費用はどの程度になるか。 A 現在、培地作成では、19 ヘクタールで約 5000 万円程度かかる。費用全体の 8 分の 1 程度である。

●質疑・討論 有機物による増殖

Q 有機排水中のミネラルが、増殖率を高めている可能性はあるか。 A ボトリオコッカスには有機物を利用するしくみがある。グルコースを添加して無機培地に入れれば、増殖率は向上する。

4.3 光合成利用微生物の培養技術と重要研究課題 都筑幹夫(東京薬科大学)

バイオマスの生産に関して、2030年以降の展望を述べていきたい。 微細藻類あるいはシアノバクテリアは多様性がある。新規の種類を探索していくか、遺伝子改変を行うかが要点となる。二酸化炭素発生の関連でいえば、Chlamydomonas reinhardtii、Dunaliella tertiolecta、Spirulina、Haematococcus lacustris、Tetraselmis cordiformis、Synechocystisなどが代表になるのではと考えている(図-17)。

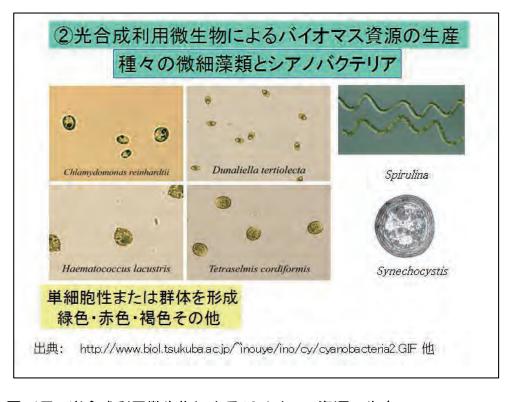


図-17 光合成利用微生物によるバイオマス資源の生産

生物種の多様性は、葉緑体の2枚膜と4枚膜の別、光合成産物のでんぷんとβポリグリカンの別などがある。増殖速度も1日で8倍~10倍まで達する。ただし、天然のバイオマスという観点からは微細藻類の種類は限られる。生産性の高いものをいかに利用していくかが重要となる。

20年以上、微細藻類の研究は行われているものの、二酸化炭素固定化の展望は見えてこないという現実がある。そこで、この事実を確かめるためにバイオマス生産速度の面から計算を行うこととした。

屋外培地での培養の場合、1 平方メートルあたり 1 日 5~22 グラムのバイオマスを生産することができる。北海道と同等の面積 7 万 8000 平 方キロメートルでは、1 日 220 万トン程度となる。石油換算で、74 万トン分のエネルギー消費を補える。

また、二酸化炭素固定の観点から計算してみると、植物や藻類の光合成活性は、葉緑素 1 ミリグラム 1 時間あたり二酸化炭素 0.08~0.4 ミリモルとなる。培養時の細胞濃度を最大値とすると、培養液 1 立方メートル 1 年あたり二酸化炭素 0.8~3.9 トン分となる。日本の年間二酸化炭素放出量 12 億トンを考えると、これを相殺するのに 100 キロメートル四方の場所を確保しなければならない。砂漠や半乾燥地の利用が今後の問題となるだろう。

さらに、光合成の要求量子数からの計算(最大効率の場合)も行ってみ

た。その結果太陽エネルギー換算で、1 平方メートル 1 年あたり二酸化 炭素 70~160 トン分となる。これは 10 キロメートル四方の面積に相 当する。工夫があれば実現可能な面積といえる(図-18)。

海上での培地を考えると、デトリタスを利用するなどの特別なシステムを構築する必要が今後は出てくるだろう。貧栄養という問題も考えなければならない。微細藻類は、大量生産と多様性の利用が将来の要点となる。

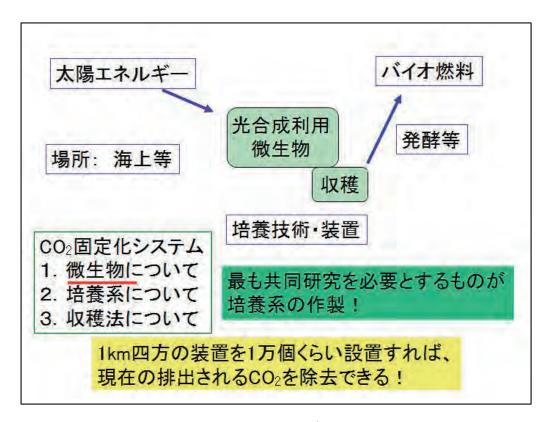


図-18 最も共同研究を必要とするものが培養系の作製

●質疑・討論 海上と陸上の培養施設

Q 発生した生物を回収して油を取るといった考え方でよいか。

A 基本的にはそうである。海上に培養装置を設置する場合は、材料工学分野や装置システム分野と連携しなければならない。二酸化炭素供給系や栄養塩拡散防止などの工夫が求められる。海上の場合は屋外での培養は無理だろう。陸上の場合は、回収は比較的容易であり、重点をコストパフォーマンスに置くか、二酸化炭素固定量に置くかの選択となる。

●質疑・討論 ラン藻の耐乾燥性

Q 培養する種類として、陸生ラン藻などは、乾燥に強く、増殖力も高く、 窒素固定もするため有望ではないか。

A 液体培養を行い、光合成をさせる装置も研究開発しているが、乾燥の問題はある。陸生の種類だと、乾燥ストレスに強いものがある。

●質疑・討論 太陽エネルギー変換効率

Q 太陽エネルギー変換効率はどの程度か。

A 細胞の濃度を上げれば、太陽エネルギー全体に対して有効利用率 10%は超えられると考える。ただし、濃度の高い状態をどこまで維持できるかにより変動はする。

4.4 大型藻類の利活用技術と展望・戦略 能登谷正浩 (東京海洋大学)

かつてアオサが大繁殖した際、アオサの利用法が検討された。二酸化炭素は吸収しても、アオサが腐食するため有用ではないという結論になった。 しかし、現在の大勢は有効利用をする方向に転換している。

二酸化炭素抑制対策として、植物の二酸化炭素ストック量を増大させることがある。造林や緑化は量的に限界に達しつつある。他に、二酸化炭素の地中埋蔵も検討されているが、技術的にはかなり難しい。

そこで、代替エネルギーの利用が考えられることになった。光合成資源の利用や、太陽光、風力などの二酸化炭素無排出エネルギーの利用などである。

近未来に予測される地球規模の危機としては、人口・食料問題、エネルギー問題、環境・水問題などがある。これらを踏まえずにエネルギー生産を考えると問題となる。環境を悪化させない方向でエネルギー生産をしていかなければならない。

バイオ燃料に関しては、最近もトウモロコシで見られるように、食糧問題とエネルギー問題の対立がある。バイオ燃料の留意点としは、まず、地球環境保全の観点が必要となる。また、栽培・生産面積に関しては、陸上で広範な栽培面積を確保することは困難であるため、海上の利用が必然的になる。バイオ燃料の活用法などにも留意しなければならない。

海上の利用には、島国であるという日本の地理的特性も利点として含まれている。日本の排他的経済水域(EEZ、Exclusive Economic Zone)

DESCRIPTION OF THE LAND OF THE

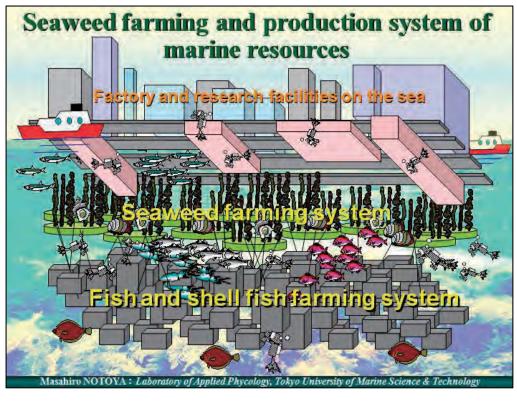
は広大である(図-19)。

図-19 EEZ of Japan is more than 10 times of the land area

大型藻類と微細藻類を比較すると、大型藻類のほうは生産力が高い。従って、大型藻類を利用すべきという認識である。また 1 ヘクタール 1 年あたり平均 36 トンの二酸化炭素を吸収するという計算もある。さらに、大型藻類は、水質浄化や沿岸の環境保全といった点でも有効活用されている。ただし大型藻類の藻場を設置していく必要がある。今後は多段階的な利用も検討すべきだろう。

海上の生態系において、海藻は基本的に重要な役割を果たしている。例えば沿岸における養殖密集領域では、かならず赤潮が発生する。また緑潮(Green Tide)の問題もある。これらの問題に対して、海苔の養殖の利用などをすることが可能である。

沖合にプラットフォームを建設し、海藻を中心とした生態系を構築して様々な物質を生産すれば、陸上を利用する必要はなくなる。九州の沖合あたりに魚資源の獲得、環境の保全、エネルギー生産という"一石三鳥"の役割を果たすプラットフォームの建設を構想している(図-20)。



☑ -20 Seaweed farming and production system of marine resources

●質疑・討論 藻類の利用における課題

Q 藻類の利用に関しては、どう養殖するか、どう獲得するか、どう栄養 塩を与えるかの三点が課題としてある。それぞれの見通しはどうか。

A 養殖に関しては、海苔、昆布、ワカメなどの養殖技術が存在する。獲得に関しては、潮流を頼りにして、津軽海峡の周辺で網をはって獲得することができる。規模としては、日本の全エネルギーの3分の1程度をまかなうものを考えている。栄養に関しては、養殖できる程度の栄養塩が海水に存在する。

●質疑・討論 養殖場の面積

Q 排他的経済水域の中に、北海道と同等の面積の養殖場を建設するような構想か。

A 大型藻類を養殖する場合は、それほどの面積は必要ない。

●質疑・討論 海上の実験

A ホンダワラの実験は行われていない。昆布の実験では北海道で、100 メートル程度の養殖場を数十基設置して生産している。暖簾状に小さな縄 をはめて、そこに昆布を付けていく方法である。中国では、非乾燥で年間 70 万トンを生産する養殖場がある。

●質疑・討論 大型藻類の利用法

- Q 大型藻類から、どのような燃料を開発することを構想しているか。
- A 現在は、水素発酵菌の利用を探索している。

4.5 セッションⅡのまとめ

柳下立夫(産業技術総合研究所)

1番目の講演は、「具体的な藻類利用技術開発概論」(原山重明教授)だった。軽油を生産する「シュードコリシスティス」が発見されている。二酸化炭素削減方法のイノベーションとして「ABC」が非常に重要である。また、シュードコリシスティスの軽油生産能力を効率のよい藻類に移す。この場合、関与する二つの酵素だけでよい。クロロフィル量の最適化、脂肪酸合成経路の最適化、新規石油生産藻類の探索と分類が今後必要となる。また、ラン藻組み換え菌と改良バイオリアクターにより 1 ヘクタール 1年間あたり 400 トンの生産量が見込まれる。通常の培養の3倍以上、軽油生産も4倍以上になるのではないか。

2 番目の講演は、「緑藻類からのバイオディーゼル生成技術と重要研究課題」(渡邉信教授)だった。ボトリオコッカスを探索して、炭化水素産生にすぐれた培養株を確保している。有機排水による光制約の解除やライフサイクル・アセスメントの検討が行われ、エネルギー収支、二酸化炭素吸収効果があることがわかっている。ただし経済性に難があり、タイやインドネシアなどで行えば経済性がある。今後の課題として、探索とカルチャーセンターの設立、野外実証、品種改良、バイオリファイナリーなどがある。現在、実用化基盤技術研究の段階で、国の投資が非常に重要である。

3番目の講演は、「光合成利用微生物の培養技術と重要研究課題」(都 筑幹夫教授)だった。光合成微生物からのバイオ燃料生産は 2030 年も しくは以降になるのではないか。また、光合成利用微生物は多様性であり、健康食品等、産業界への利用は行われていて、培養技術も確立されている。 100km 四方の培地があれば日本の年間二酸化炭素排出量を固定化できる。最大効率として考えると、3.3km 四方で固定化できるのではないか。 海洋を用いた場合、デトリタスの利用が考えられる。

4番目の講演は、「大型藻類の利活用技術と展望・戦略」(能登谷正浩教授)だった。バイオ燃料開発の留意点として、環境保全、栽培・生産面積が重要であり、海洋を利用する方法が望ましいのではないか。バイオマス資源の生産として、陸域と海域の比較をしたところ海域の方が非常によい。生産力は大型藻類が高く、また1ヘクタール1年間あたり二酸化炭素36トンの固定能力がある。大型藻類は環境保全、水質浄化に利用でき、海産物資源の改善、有用産物の利用、カスケード利用が望ましい。将来は沖合にプラットフォームを形成し、利用していきたい。

4.6 セッションⅡ総合討論

●質疑・討論 脂肪酸の燃料利用

Q 脂肪酸の燃料利用の可能性はどうか。脂肪酸は酸素が含まれている分、 燃焼効率は劣る。しかし、脂肪酸を蓄積も利用されうるのではないか。

A 欧州では、ナタネ油の脂肪酸などはバイオディーゼル用として実用化されている。方向性としてはあり得るだろう。酸素を除去した状態になれば、グラムあたりの熱量も向上する。

A 脂肪酸の蓄積量が高い種類を利用すればよい。しかし、遺伝子組み換えをした種類が屋外に拡散してよいかどうか、制限のしかたが今後の議論すべき問題になるだろう。

A バイオディーゼル燃料 (BDF、Bio-diesel Fuel) の定義からいえば、 脂肪酸はメチルエステルなので燃料として含められる。しかし、炭化水素 を大量に純粋に生成している中で、それを脂肪酸と混合して不純化するこ とには疑問がある。混合した場合の効果は、例えばボトリオコッカスの場 合、変換効率は炭化水素で 45%だったものが脂肪酸を含めると 55%に 向上する程度である。

A 燃焼技術の観点からは、分子量が大きすぎる物質は不都合となる。植物は分子量が大きすぎるために燃焼しにくい。分子量300以下に抑えて

おく必要がある。最近は、パーム油から酸素を排除して水素ガス化する技術なども開発されている。

●質疑・討論 微細藻類の利用と処理

Q かつて、微細藻類の利用が大いに注目されていたころ、残った藻類の 菌体をどう処理するかが問題となった。その点を考えていかなければなら ない。

A 藻類のエネルギー利用研究は、1970 年代のエネルギー危機のとき、 米国では国立再生エネルギー研究所(NREL、National Renewable Energy Laboratory)が中心となり着手した。藻類からエネルギーを獲 得するプロジェクトが行われたが、1996 年に停止している。停止した 理由は、屋内培養による増殖を屋外培養で再現するのが困難なことだった。 今後は、屋外培養技術をいかに発展させるかが問題となる。さらに、廃棄 物をどう扱うかという問題がある。例えばボトリオコッカスではリポ多糖 類が相当量、生産されるが、これはかなりの部分、利用できる。残渣に関 しても藻類はセルロース系ではないので飼料などとしての用途がある。

●質疑・討論 ボトリオコッカス由来燃料の価格設定

Q ボトリオコッカスによる燃料における「1 リットル 150 円」の価格設定は、現在のセルロース系バイオマスからのエタノール生産費用と同等となる。次世代における微細藻類の利用に対して、どのような意義を見出せばよいか。

A 米国の報告などでは、他の種類でも「1 リットル 150 円」と同様の価格が出されている。原油コストと比較すると赤字となるが、真の目標は「1 リットル 100 円以下」である。米国も80 円台という、さらなる目標を設定している。コスト削減のための技術開発の余地は存在する。屋外培養には1 リットル 100 円を切る可能性がある。屋内培養は、1 リットル 200 円を切ることを一つの目標としている。

●意見 微細藻類利用技術に対するメタボロミクスの利用

C セッション I の議論から、メタボロミクスと合成生物工学を、微細藻類の利用技術に活用できるのではないかと考えるに至った。エネルギー変換効率を高めていくなかで、メタボロミクスは役立つのではないか。

●質疑・討論 ボトリオコッカス利用大規模エネルギー生産の費用

Q ボトリオコッカスを利用した大規模エネルギー生産システムの投入 コスト計算では、東南アジアで培養を行うと費用が大幅に削減されていた。 3億7300万円の費用が、タイでは7300万円、インドネシアだと6000 万円で済むという。ほとんどの要素は人件費ということか。

A 基本的には人件費である。タイでは 10 分の 1、インドネシアや中国 では5分の1となる。なお、3億7000万円の半分ほどは初期投資費用 である。維持費を 1 億 8000 万円とすると、うち 5000 万円が、培地 製作経費となる。

●質疑・討論 米国における屋外培養技術の研究開発

米国国立再生エネルギー研究所(NREL、National Renewable Energy Laboratory) は、最近になり屋外培養の研究を再開していると 聞く。具体的な課題はどのようなものがあるか。

A 1996 年に米国が研究予算を削減した理由は二点あった。一点目は技 術的に頭打ちとなったからである。もう一点は、産業界に牽引させようと したからである。最近の米国の藻類利用技術の高まりは、産業界から起き ているものである。屋外培養と屋内培養の両者を上手に配合しながら、技 術開発を進めているのではないだろうか。

●質疑・討論 遺伝子組換えの安全対策

Q 屋外培養をする場合、遺伝子組換えの問題をどうすべきか。海藻や微 細藻類では大きな問題が起きると考える。

A 遺伝子組み換えをする前に、従来の変異体を利用することから考えは じめるべきである。進化工学的方法はかなり発展している。遺伝子組み換 え藻類を屋外培養で利用するということは、国内では至難の業だと考える。 日本では非土着微生物の利用に関してさえ慎重論がある。

●質疑・討論 環境低負荷生産システムの実現性

Q ここまでの討論で、セッションⅡの仮説⑥「軽油や重油等を多量に蓄 積する有効な藻類が開発される」と仮説で「微小生物・大型藻類を大量培 養・栽培技術が完成し、エネルギー収支の高い、資源化が可能となる」に 関しては、議論が行われてきた。仮説8「海洋を使用した環境低負荷の生

産システムが構築される」に関して、議論をしていきたい。

A 仮説®の実現性が、最も難しい。プラットフォームに費用をかけすぎてはいけない。培養に関しても塩濃度を高くする必要があるため、環境バランスをどうとるべきか、材料工学分野などとの議論が必要となる。工学分野の専門家と連携することが今後、重要となる。

●質疑・討論 大型藻類の栄養摂取

Q 大型藻類の利用技術では、窒素、リン、鉄などの栄養素と燃料生産量 との関係はどうなっているのか。

A 現在の構想では、大型藻類は沿岸に置かれれば栄養は十分に確保できる。沖合に作る場合は、そこに生態系ができるため、動物プランクトンなどの増加が見込まれている。栄養塩の投入がなくても、技術開発で問題は克服できるだろう。大型藻類は、栄養分が少なくても吸収力があるため問題は小さい。

●質疑・討論 大型藻類のリサイクル

Q 大型藻類を持続的に利用していくには、リサイクルが必要となる。環境評価はどのようになっているのか。

A 海藻の場合、ミネラル分の吸収効率は非常に高いとされている。陸上生物で考えるような問題はないと思われる。

●質疑・討論 バイオマス利用がもたらす生態系への影響

Q 海上でバイオマス利用を行う場合、他の生物への影響がどうなるかは 重大な問題となる。現在の海洋工学では、その問題をどのように考えてい るのか。

A 沖合における大規模実験の例はない。しかし、沿岸では自然状態でも 流れ藻が相当量あるので、その状況と大差はないだろう。

A 沖合の海底には、植物プランクトンと大型魚類しか存在しない。利用規模をどの程度にするかにより、影響は異なってくるのではないか。現在の問題は、海洋の利用に対する見解が不統一であることである。基本研究は少額で行えるが、将来的には大型の資金が必要となる。その前段階に、分野を超えたコミュニケーションをとっておかなければ、開発がおぼつかなくなる。

●質疑・討論 リン酸の有効利用

Q 海水を利用する利点の一つが、リン酸の回収ができるということである。リン酸を吸収した海藻を、陸上に移動させることになる。バイオ燃料やバイオリファイナリーで利用された後に残ったリン酸をどのように利用するか、検討すべきである。なお、米国から輸入されるトウモロコシ1600万トンのうち、窒素40万トン、リン20万トンが含まれており、すべてが海洋に流出する。沿岸の栄養量が多くなり、海藻が育ちやすくなる。

A 日本は、海外から食糧を相当量、輸入している。これはある意味、窒素やリンを取り入れていることとなる。総量的には日本ではリンは余剰状態となっている。ただし、リンを回収しようとすると重金属が混入しているため、その点は課題としてある。

●意見 バイオリアクターの設置場所

C 大型藻類の利用では、バイオリアクターを陸上に設置して、あとは排水処理を解決すればよいだけなので環境問題としては解決可能である。むしろ問題は、陸地の面積をどれほど確保できるかにある。山岳地帯の森林を伐採して開発することは許されない。必然的に、広大な土地を海外に求めることになる。しかし、複雑な問題が生じることが予想される。

●質疑・討論 藻類のスクリーニング

Q 多種多様な藻類をスクリーニングするしくみに関しての意見や情報を求めたい。

A 米国国立再生エネルギー研究所(NREL、National Renewable Energy Laboratory)が数千種類の藻類をスクリーニングしている。燃料生産に優れた藻類株を300株ほど保有している。しかし、日本がスクリーニングを行う必要もある。国内における資源の状況を把握しておく必要があるからだ。この1、2年の短期間で、米国並みのスクリーニングを達成しなければならない。

A 遺伝子組換え技術においてもスクリーニングは極めて重要となる。環境に放出されるかどうかは別として、研究レベルでは遺伝子組換えは必要不可欠である。

4.7 「セッションⅡ」の記録

本ワークショップにおいては、各セッションでのプレゼンテーション、 質疑応答、さらに討論の要点を柳下立夫氏(産総研)が逐次記録し、 必要に応じてコーディネータ等が参照できるようにするとともに、各 セッションの最後に参加者全員に提示することによって、WSで交換 された情報・意見を確認し、さらなる討議にも資するようにした。 以下に、本セッションII「水生微小生物(微細藻類)を活用するバイ オ燃料生産の可能性」に関するその記録内容をまとめて記す。

第1講演者 原山重明(中大) 具体的な藻類利用技術開発概論

- ○軽油を生産する藻類の発見 窒素欠乏時に細胞内にアルカンを蓄積
- O Pseudochoricystis Botryococcus に近縁
- O CO_2 削減方法のイノベーション \rightarrow ABC Project (Algae=Biofuel+ CO_2 reduction)
- Pseudochoricystis の軽油生産能力をより効率のよい藻類に移す 2つの酵素
- ○クロロフィル量の最適化、脂肪酸合成経路の最適化
- ○新規石油生産藻類の探索と分類
- ○藍藻組み換え菌/改良バイオリアクター 400 t/h/y(3 倍強) 軽油 生産 50 t/ha/y (4 倍強)

質疑

- ・軽油は燃費が良い。
- ・BTL と藻類からの軽油生産の比較
 - →Wet から Dry はエネルギーがかかる
- ・木質→燃料 水生バイオマス→燃料の比較
 - →水生バイオマスからの燃料回収次第
- ・陸生油脂植物と水生油脂植物との収率の比較
 - →水牛油脂植物のほうが非常に高い

第 2 講演者 渡邉信(筑波大)緑藻類からのバイオディーゼル生成技術と重要研究課題

- ○藻類のオイル生産ポテンシャルが非常に高い
- O Botryococcus 増殖および炭化水素生産に優れた培養株の確保高アルカリ領域増殖 光制約の解除 LCA の検討

- ○有機排水の利用により光制約の解除
- ○エネルギー収支、CO₂ 吸収効果は+ 経済性に難 タイ、インドネシアでは経済性がある
- ○課題:探索とカルチャーセンターの設立 野外実証 品種改良 バイオリファイナリー
 - ○実用化基盤技術研究の段階 国の投資が重要

質疑

- ・連続培養法の適用は可能か
 - →油だけをとる場合の収率は60%
- ・ 有機排水による光制約の解除の機構は?
 - →光独立栄養から化学従属栄養にシフト
- ・菌株の検証 LCA の検討
 - →オープンポンドで検討 クローズドでは困難
- ・肥料
- →コスト計算の 1/8 程度

第 3 講演者 都筑幹夫(東京薬科大)光合成利用微生物の培養技術と 重要研究課題

- 〇光合成微生物からのバイオ燃料 2030年かその後
- ○光合成利用微生物の多様性
- ○産業界への利用(健康食品) 培養技術の確立
- O100 km 四方で日本の年間 CO_2 排出量を固定 最大効率として、3.3 km 四方で固定
- ○海洋でのデトリタスの利用

質疑

- ・微細藻類の利用法は
 - \rightarrow バイオリアクター装置の問題 コストパフォーマンスか CO_2 固定量か 海上ではクローズド系
- ・陸生藍藻の利用は?
 - \rightarrow ベルトコンベア型 CO_2 固定化装置等がある。耐乾性の微細藻類もある。
- ・太陽エネルギー変換効率は?
 - →細胞濃度次第 10%は超えているか

第4講演者 能登谷正浩 (東京海洋大) 大型藻類の利活用技術と展望・ 戦略

- OCO_2 排出抑制対策と資源利用: CO_2 ストック量と代替エネルギーの利用
- ○地球規模の危機:人口・食料、エネルギー、環境・水 環境を悪化させない技術 バイオ燃料に係る諸問題
- ○バイオ燃料開発の留意点 環境保全、栽培・生産面積→海洋の利用
- ○バイオマス資源生産:陸域と海域の比較
- ○生産力は大型藻類が高い
- O36 CO2-t/ha/y の固定能力
- 〇大型藻類は環境保全、水質浄化として利用できる 海産物資源の改善 有用産物の利用、そして残ったものをエネルギー利用
- ○将来は沖合いにプラットフォームの形成

質疑

- ・栽培、回収、栄養
 - →海苔、昆布等の培養技術 日本の消費エネルギーの 1/3 を目指す
- ・エネルギー生産を主眼とした実証は?
 - →北海道では既に行われている。中国では 70 万 t 昆布は集約化可能
- ・バイオ燃料としての想定は
- →アルギン酸、マニトールからのエタノール発酵 ホンダワラは水素 発酵へ

討論・セッションⅡまとめ

- ・脂肪酸の利用は
 - →可能性はある ただし、より還元化された状態の油脂を利用できればよい 遺伝子組み換えを用いたものを利用できるが、閉鎖系の確立が必要
- ・過去の微細藻類開発のブームで、残った藻類の利用が問題 炭化水素 生産菌の次々世代の開発は何か?
 - →室内実験の利用から屋外実験の利用へ 残渣は分解性が良いので 多様な利用方法は可能 100円/L以下のコスト削減のための課題が 残っている
- ・メタボロミクスと合成生物工学の適用は
- →将来非常に有望

[1]

- ・コストに係る人件費は? →高い 初期投資が半分 メンテナンス費の半分が培地作製費
- ・米国のファンディング →昨今の米国でのブームは産業界から
- ・オープンポンドでの遺伝子改良菌の利用の問題は? →突然変異体の利用 次々世代では遺伝子改良菌を利用、オープンで は困難
- ・仮説窓への議論
 - →プラットフォーム 低コスト化 材料工学的な知見が必要 大型 藻類、植物プランクトンのどちらを利用するか
 - →大型藻類は沿岸で可能 沖合いでは新しい環境場 漁場生成等の 利点も 流れがあれば栄養の吸収が高い(次々世代への課題)
- ・他の生物への影響
 - →大型藻類では沖合いでの実施例はない 沿岸では問題ない
 - →沖合いでは植物プランクトンのみ 次々世代に向けては領域を超 えたコミュニケーションの醸成が必要
- ・リン酸の循環 ミネラルニュートラルの観点 →グローバル的な視野
- ・スクリーニングに関して
 - →米国が既に大規模に着手 産業化した場合、国産バイオマスの利用 が必要か
 - →遺伝子組み換えの技術は必要

5. セッションⅢ 総合討論

5.1 マリンバイオによる燃料生産への期待松永是(東京農工大学)

1970年代、石油危機の際、代替エネルギーとして水素、メタン、メタノール、炭化水素などのバイオ燃料が注目された。1990年代に地球温暖化がいわれるようになると、生物による二酸化炭素固定が注目され、水素、エタノール、炭化水素などへの燃料の転換が検討されるようになった。2000年に入ると、地球温暖化防止と原油高騰の点から、バイオエタノール、エチル・ターシャリー・ブチル・エーテル(ETBE、Ethyl Tertiary Butyl Ether)バイオディーゼルなどに研究開発の焦点が絞られてきた。

欧州や東南アジアなどでは、ナタネ油、パームオイル、オリーブオイル、 廃油などの油脂からグリセリンをエステル交換により取り除き、バイオディーゼルを生成している。

バイオ燃料の原料を、植物の食べられない部分から調達すべきという議論が起きている。バイオディーゼル燃料に関しては、植物油の廃液をエステル交換し、自動車燃料として利用することが可能となるかもしれない。日本では、バイオエタノールにイソブテンを加え、エチル・ターシャリー・ブチル・エーテルにして従来の燃料に3%ほど加える方式である。

微細藻類に関しては、スピルリナ、ドナリエラ、アスタキサンチンなどの生産での屋外設備や屋内設備が大規模面積で建設されている。バイオ燃料への転用の方法が今後の焦点となる。

日本は国土が狭いながら、海域は広い。海洋はバイオマスの資源が豊富にある。バイオマスとしては、資源量の多いもの、持続的生産ができるもの、多様性に富むものが重要となる。実際、養殖が行われており、生産系が確立されているため、日本や中国は強みをもっていることになる。エタノール生産への有力な候補となるだろう。

微生物資源に関しては、培養できる種類は 1%ほどで、あとは培養できない。光合成細菌、シアノバクテリア、油を作る微細藻類などが有望であり、今後も燃料を効率よく生産する株が分離される可能性がある。また培養できない海生生物の遺伝子を集めたメタゲノム・ライブラリを構築していく必要がある。

バイオディーゼルに関しては、電源開発(J-Power)と共同で、海洋 微細藻類の中性脂質をバイオディーゼル燃料に利用する研究を行っている。JPCC-A 株(図-21) などの興味深い株が複数、分離されている。

分離した株からは、軽油でなくバイオディーゼル燃料となる、グリセロー ルのエステルが生産されている。パーム油の生産量は、1平方メートル1 年間あたり374グラムである。対して、微細藻類による油分生産量は、 同 560 グラムとなる。パーム油などの 10 倍の生産量を期待できるとい う開発者もいる。

藻類の培養には、室内型、室外リアクター型、層型などがある。最近、 注目しているのはヤマハ発動機の培養技術である。室内リアクターで、質 の高いヘマトコッカスを培養している。また、外国の研究グループは、魚 の養殖技術を応用した野外リアクターで、ナノクロロプシスを培養する開 発がなされている。

微細藻類を、どう収集し、どう培養するかといった課題がある。収集法 としては、例えば、発電所が排出する石炭灰を玉状にして、表面で微細藻 類を培養するといった考え方がある。1990 年末の段階で、1 平方メー トル1日あたり1.5~1.6グラムの培養を実現している。

微細藻類を培養する場合、他の生物への影響が注目される。20 年後か ら30年後の理想としては、微細藻類を植物プランクトンが食べ、それを **魚類が食べるという食のサイクルを保ちながら燃料生産をする技術が究** 極的なものになるのではないだろうか。

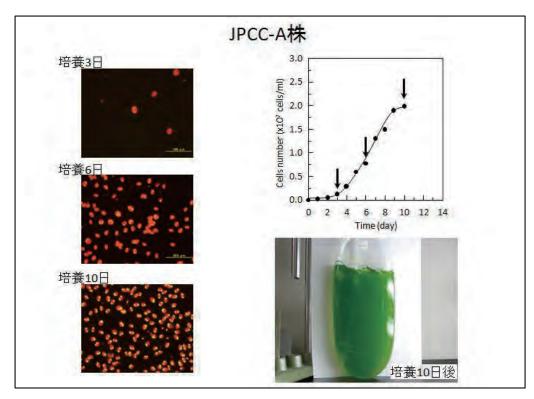


図-21 JPCC-A 株

●質疑・討論 微細藻類と二酸化炭素削減

Q 二酸化炭素削減につながる微細藻類を海洋に浮遊させながら、バイオ 燃料を生産するといったことを狙いとしているのか。

A 二酸化炭素排出や石油価格高騰を抑える力になるような生産方法の一つとして考えている。1990 年代に東芝と共同研究した二酸化炭素固定法が、燃料生産法として考えられるのではないか。

5.2 自動車用バイオ燃料の利用と普及に関する現状と課題

大聖泰弘(早稲田大学)

自動車開発の立場から、自動車用バイオ燃料の利用と普及に関する現状と課題を述べたい。関連する議論が、資源エネルギー庁新エネルギー部会 や、座長をしている環境省エコ燃料利用推進会議などで行われている。

多種多様のバイオ燃料の中でも、自動車用途が大きな注目を集めている。 2010年の国内バイオ燃料利用目標では、原油換算304万キロリットルのうち、運輸での利用が50万キロリットルとなっている。ただし、残りは熱利用である。バイオ燃料の正当な使い方は熱源に利用することであり、付加価値をつける意味で、自動車用燃料として使うということが、方法としてはよりよいのではないかと考えている。

自動車用途の新燃料が普及するための条件としては、従来の燃料と同様の信頼性がある点、石油代替性がある点、安定的な供給が可能で再生可能性もある点、環境負荷への影響が考慮されている点などが挙げられる。さらに、燃料の供給や取り扱いの利便性や搭載性を確保する必要もある。また、従来のエンジンや燃料との互換性が高いことも必要である。

バイオ燃料の最も特徴的な点は、従来の燃料と混合して使えることにある。バイオエタノールは、すべてをガソリンと代替しても利用できる。バイオディーゼルも代替率 100%でもエンジンは作動する。ブラジルや米国では、フレックス燃料車(FFV、Flexible Fuel Vehicle)が走っている。細部の部品交換は必要だが、費用的に大きな問題はなく、従来の技術の延長で実現する。

将来の自動車の種類としては、2030 年頃も、ガソリンエンジンの火 花点火エンジン車、ディーゼルエンジンの圧縮着火エンジン車、燃料電池

車、電気自動車の 4 種がベストミックスで使用されているのではないだ ろうか。環境負荷や二酸化炭素に配慮し、また経済を考慮した上で大勢や 比率が決まっていくことになるだろう。

国際エネルギー機関 (IEA、International Energy Agency) の 『World Energy Outlook 2006』によると、2030年の世界の1次エネルギー 需要で、石炭やガスなどの全エネルギーのうち石油が 2 割を占めるとい う。 途上国のモータリゼーションの進展が大きく影響し、今後、右肩上 がりに輸送用燃料用途の石油使用量が増大していくことが考えられる。

日本国内で、バイオ燃料の種類を検討する議論をしている間に、欧州で は次の段階の議論に進んでいる。海外からは、なぜ日本は後ろ向きのこと をしているのかという視線で見られている。

バイオマス液化(BTL Biomass to Liquid)、ガス液化(Gas To Liquid)、 石炭液化(CTL、Coal to Liquid)を含め、フィッシャー・トロプシュ 法を用いれば広く合成することができる。しかし、収集、選別、前処理工 程などに費用が掛かるのではないか。中国では、石炭からジメチルエーテ ルを生産する方法もバス等に採用されているが、二酸化炭素削減対策には ならないので心配している。

環境省は、2030 年までにガソリンや軽油の代替として、バイオマス 燃料の導入目標値を掲げている。同年までに 400 万キロリットル、熱量 換算で 1 割程度をバイオマス燃料とする目標を立てている。その程度に なるのではないか。

ガソリン車の二酸化炭素排出量を 100 とすると、新技術でどの程度排 出量を削減できるか計算した。将来のガソリン車では2~3割、二酸化炭 素排出が減る。現在のディーゼル車もガソリン車に比べて 2 割ほど排出 量は低いが、二酸化炭素排出削減に現実的なものは、軽自動車サイズの電 気自動車であり、現在のガソリン車より8割弱削減できる(図-23)。

また、自動車の軽量化にも大きな潜在力があると考えている。鉄を薄く する技術は、新日本製鐵や JFE スチールなどの日本企業が世界を牽引し ている。2050 年までに、運輸部門では二酸化炭素の排出量を 7 割ほど 減らせるのではないかと考えている。うち 4 割は、従来の自動車の燃費 改善技術でまかなえる。また、非化石燃料・エネルギーの利用も効果的で ある。さらに、自動車の利用方法を、情報通信技術を駆使して改善してい くといったことも重要となる(図-24)。

先進国の排ガス対策は、規制が進んでおり、2010 年頃には解決して 終了すると考えられる。ただし、途上国の大気汚染問題は先進国より 10 ~20 年遅れて訪れるだろう。むしろ脱石油化の課題のほうが大きいのではないか。

超長期を展望した議論を新エネルギー庁とともに行っている。三つの選択肢、つまり原子力、再生可能エネルギー、石炭などの化石燃料の利用が考えられている。これらに共通した要素は、電力と水素である。液体燃料として可能性のある選択肢は、再生可能エネルギーだろう。三つの選択肢のバランスをうまくとっていくことが重要である。

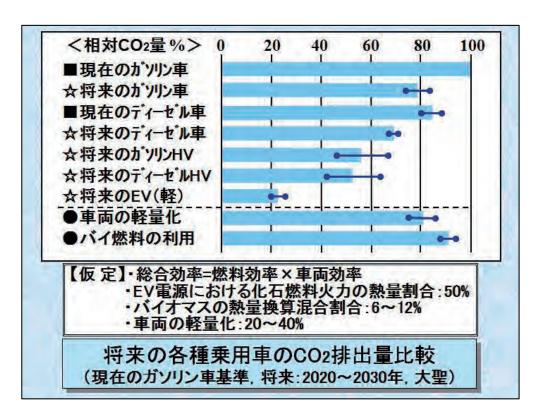
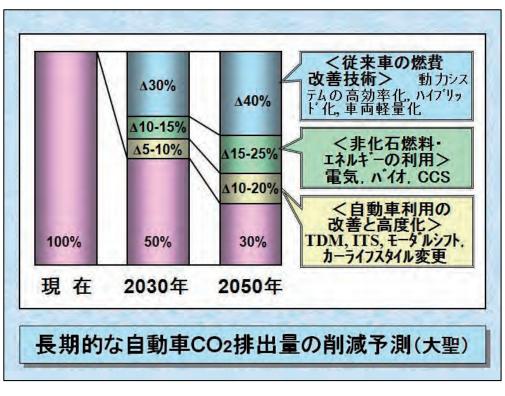


図-23 将来の各種乗用車の CO₂排出量比較



長期的な自動車 CO2排出量の削減予測

●質疑・討論 ディーゼル車の性能向上と復活

Q ディーゼルカーの性能が騒音の面でも、排ガスの面でも改善されてき ていると聞く。状況はどうか。

A 市場シェアは 0.1%未満になっているが、今後、復活してくると考え ている。日産自動車が先陣を切り、三菱自動車や本田技研工業などが追随 してくるだろう。これらの企業は米国市場を視野に入れている。後処理技 術が進み、触媒やフィルターを組み合わせる燃焼技術も実現しているため、 市場として見込みがあるということである。燃費がよい分、税の優遇も行 われるだろう。

●質疑・討論 燃料電池車などの展望

Q 2050 年には電気自動車がシェアを占めるため、バイオ燃料は不要で あるという議論もあるが、見込みはどうか。

A 2030 年までは、電池技術の主役はリチウムイオン電池のまま続いて いくだろう。経済産業省はコストを 7 分の 1 にする提案をしている。た だし、性能改善の程度には不透明な部分がある。電気自動車を使用すれば、 水素技術を用いた自動車は不要になるという話も出てくるだろう。現在、

自動車業界は水素・燃料電池実証プロジェクト(JHFC、Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project)を発足させて、2015年の燃料電池技術の事業化を検討し、その方向で見解が一致している。ただし、コスト削減とインフラストラクチャー整備が困難な課題としてある。日本に5万カ所あるガソリンスタンドを水素スタンドに変えることが想定しづらい。

●質疑・討論 含水エタノールの可能性

Q 含水エタノールの利用の可能性はどうか。

A 腐食を防げれば、含水エタノールでもエンジン作動させることができる。窒素酸化物の排出量削減が利点としてある。アルミとゴムの対策は必要である。

●質疑・討論 バイオ燃料開発の必要性

Q 現在、日本の石油利用のうち、ガソリンが 27%、ナフサが 22%程度である。ナフサは基本的に化成品となっている。これらは最終的に燃やされて熱源になる。27%のガソリンのために、エネルギー効率の悪いバイオエタノールを生成するよりも、いま使われている化成品をバイオエタノールの代替とするということは考えられないか。バイオエタノール関連の分野に研究費が行きすぎている分を、バイオプラスチックなどのリファイナリーに投じるほうが得策だと考えている。そもそも、植物本来の工程を活かして、石油代替物を作るほうがエネルギー面でもはるかに合理的ではないか。

A 日本では石油のリファイナリーが余剰しており、現在の稼働率は80%程度である。米国への輸出も行っている。ガソリンも軽油も海外に売りはじめている。二酸化炭素削減対策が奏効した面もあるだろう。その上で、バイオ燃料が本当に必要なのかという議論は、たしかに底流にはある。

5.3 討論とセッションⅢのまとめ

●質疑・討論 硫酸糖化

Q 硫酸糖化によるバイオマス燃料の生成法がある。対して、なぜセルロ ースによる酵素糖化が必要となるか、確認したい。

A 硫酸糖化では、希硫酸と濃硫酸が存在する。希硫酸は、収率的問題か ら理論的にも工業的にも分解することは不可能である。いっぽう、濃硫酸 の技術は戦前からあり、技術的に成熟しつくしている。現在の 1 リット ルあたり 160 円程度のエタノールのコストをさらに低価格化するには、 濃硫酸糖化でなくバイオの技術(酵素糖化)を用いる必要が出てくる。バ イオプラスチックの生成に関しては、ガス化または糖化が用いられる。

●質疑・討論 システムの構築

Q 今日の議論では、各分野の技術と知見を統合したいという声が大きか った。バイオインフォマティクスの利用や、海洋工学との連携などの必要 性を感じさせる議論であった。一方で、システムを検討するという観点が 議論に含まれていなかった。「バイオマス資源の 100%有効利用」 という 意味でなく、廃棄物を処理する観点でのシステムの考え方はできると考え る。海洋施設に関する発表でも、プラットフォームらしいものを想像でき ても、具体化までの道程が弱い印象をもった。システムとして考えていく ことが、今後の方向性となるだろう。

A 微細藻類による資源生産では、陸上に設備を置けば将来性は高くなる が、場所不足の問題が生じる。いっぽう海水利用では、北方海域の温度不 足などの問題がある。いくつかの欠如している部分をどのように解決して いくかが今後の課題である。

●質疑・討論 システム構築と海外協力

A 将来への方向性として、グランドデザインを構築し、それに向けて各 技術を開発していくといった順序が妥当ではないかと考える。バイオマス 資源の食糧問題があがる中で、藻類は将来有望な選択肢の一つになるだろ う。日本でバイオマス原料をまかなえればよいが、限界がある。そこで、 アジアに視野を広げるのも一つの手段となる。バイオディーゼルの6~8 割を占める原料費の問題を含め、規模的に 1 力所に集積できるかという

問題がある。どのような規模の培地をデザインするかを考え、その上でどのような技術を適用していくかを示すロードマップがあるとよい。国内だけでなくアジアや欧州などの海外との連携も考えられる。早い時期に、段階的に産業化していくことになればよい。アジアでまとまらないと、欧州連合や米国に対抗できないといった危惧がある。

A 2030年の時点で、海外で生成したものを日本に輸入するというのは難しくなっているのではないか。食糧自給も含め、自給自足の潮流が起きている。日本でも、次々世代では自国の海を利用していくことを前面に出していくほうが得策ではないか。ロードマップに関しては、2020年までの期間であれば細部にわたるものを作ることができると考える。ただ、さらに先の将来に関しては、目的だけ明確にした粗いロードマップがあればよいのではないか。

Q 国際的協力は日本の最も弱みとする部分である。国内でも、学会や大学の相互連携が進んでいない。国際的協力の段階に進むためには、解決しなければならない問題が多くある。普段されていないコミュニケーションを深めるためのシステム構築や、融合を促進するインセンティブをもったファンディングの企画の方法などを議論していただきたい。例えば、応用物理学会は、自分たちが包含する技術のロードマップを作成している。こうした働きかけが重要となる。また、中長期的な視野に立ったとき、基盤技術的問題がどの点にあるのかを具体的に指摘していただきたい。

A アジア全体のバイオマス有効利用に寄与するために日本の技術を広めていくべきだと考える。アジアでは科学技術が発達している。環境評価も含め、相互利益をもたらす方向に進んでいくべきではないか。

A 国内地域的に考えると、バイオ燃料の需要はある。温室栽培で用いる 重油の価格が高騰するなどしている。地域社会で小規模分散型のバイオ燃料生産をするという需要は確実にある。国際的な観点では、原油国と非原油国の状況が大きく異なる。非原油国は、化石燃料以外の方法でエネルギー資源を自前でどのくらい準備できるかが大きな問題となっている。日本は100%まで行かずとも、ある程度は自給できる技術開発が必要である。自国だけでは制限があるため、国際協力をするしか道はない。2030年には、国際協力と共同研究がより一層、重要になるのではないか。

●質疑・討論 シーズからの提案

Q 従来できないようなことをやろうとするとき、どのような問題がある か。バイオマス利用の観点から、自由に議論をしていただきたい。

A 存在するシーズを、どのように投資すれば、汎用技術が生まれ、実用 的な優れた成果が生まれるのかを参加者は示していただきたい。新しい科 学に立脚したテーマをいただきたい。最近の戦略的創造研究推進事業 (CREST) では、科学的な要素を含めつつ、明確なシナリオを作らなく ても出口を見据えなければならないという視点が入ってきている。

A この場で、科学的に斬新な発想を出して具体的な夢を述べることはで きない。産業と連携をすれば秘密保持をしなければならない。よって出口 を中心とした話をせざるをえない。一般論では、藻類の増殖と油の生産が 1.5~2.5 倍に向上するアイデアはある。また、1 ヘクタール 1 年間あた りの燃料生産量を従来のものより 1 桁分向上させることも不可能ではな い。しかし、具体的にこの場で述べるわけにはいかない。そうした話を求 めるのであれば、ワークショップの設定のしかたを変えてもらわなければ ならない。

Q 今後目指す基盤技術の問題や課題を指摘していただくのが今回のワ ークショップの趣旨である。経済産業省や農林水産省などのファンディン グに比べて、文部科学省はより遠い、次々世代の将来を見通すことが求め られている。大きな方向性を各専門の立場から指摘していただきたい。

A 文部科学省は、経済産業省とは異なる観点から、応用につながらなく ても、またリスクがあってもよいので、シーズを求めている。また、企業 の産業活動として行えることと行えないことの見極めもしていきたい。企 業が資金を出せる部分に、国が資金を出す必要はないと考えている。企業 が行いたいけれども行えない部分の研究を拾い上げていきたいと考えて いる。

●質疑・討論 セルロソーム研究の展望

Q Clostridium のセルロソームは、ナノマシンのような印象を受けた。 ナノマシン的な観点でセルラーゼなどの研究をするとどのような利点が あるのか。

A 実際の効果がどのようにして現れているかは解明されていない。研究 価値のある内容だと考えている。ただし、Clostridiumのセルロソームの みを対象としても、解明はできないだろう。セルロソームが細胞壁をどの ように攻撃しているのかといった、植物の細胞壁の構造との関係で研究し なければならない。各分野の研究者が協力して進める方向性が最重要とな る。

●質疑・討論 資源問題の根本的解決のために

Q 石油資源からの脱却は至上命題である。この命題を比較的早く表面的にでも解決するのか、それとも一挙に深くまで踏み込んで根本的に変革してしまうのか、二つの考え方がある。後者の場合、植物の基礎的な研究を含め、様々なことを進めていく必要がある。

A 微生物や植物の分野にファンディングが不足している理由は、医学部 や薬学部などのヒトを研究する分野に行ってしまっているからである。ヒ トの研究はヒトのことがわかれば目標は達成される。その意味ではヒトの 研究は情報量が少ないといえる。また、病気はタンパク質の異常を基本と しているため、より複雑な代謝物の問題は二次的なものとなる。にもかか わらずヒトの研究は重視されている。この形勢を逆転するには、大義名分 が必要となる。例えば「ヒトの研究に 1000 億円を使って 1 年程度の寿 命を伸ばしているが、それよりも人類の生存の危機が刻々と迫っている。 どちらに研究資金を使うべきか」といったことを掲げてキャンペーンを張 らなければならない。優秀な若手人材確保でも「人類が危機にさらされて いるときに、あなたたちはその局面に立つことになる」などと呼びかけな ければならない。次々々世代ごろには、ヒトの研究においても、代謝産物 の重要性が見えてくるだろう。代謝産物がタンパク質の代謝系を制御して いるような知見もある。生物全体のシステムを解明するには、プロテオミ クスやメタボロミクスなどの地味な研究を長期にわたり続けていかなけ ればならない。

A 微生物を利用する場合、毒性への耐性を備えなければならない。タンパク質を1種類だけ制御するような小規模な方法では耐性は得られない。また、バイオ燃料のエネルギー収率を高めるためにも、タンパク質を1種類だけ制御しても意味がない。全体を統合する技術を確立すれば、多様な種類の中から最適な要素を導入したりすることが可能になる。構築してきたメタゲノムのデータベースなどから最適な酵素を導入したり、一からインシリコでデザインしたりすることが必要だと考える。世界最高水準の統合的技術をもっていれば、20年後や30年後に目標が変わったとしても対応が可能となる。

●質疑・討論 ファンディングのあり方

C 人材育成の面で使い道のあるファンディングを期待したい。自分の将

来に関わる研究であることを示せば、優秀な学生が集まる時代になってき ている。また、アジア地区を重点的に、グローバル化を考えなければなら ない。資源、環境、エネルギー問題は日本の問題だけではない。日本の要 素技術と、韓国や台湾などの総合技術とを連携させて実用化を目指す視点 が必要である。利用しやすい国際共同研究関連のファンディングにも期待 している。

C 研究開発戦略センターの戦略提言には、必要な国際的枠組みとして、 途上国を含む国際的な自然エネルギー技術やそれを利用したエネルギー 供給システムの普及のため、技術的・制度的検討等を行う国際タスクフォ ース設置が必要であることを明記している。また、グローバルな普及を加 速するための国際共同プログラムの議論と実施、分散型オンサイト発電シ ステムの発展途上国への普及、砂漠・洋上・宇宙における発電・送電シス テムの開発、ASEAN 諸国と連携したバイオマス資源利用のための総合プ ロジェクト、再生可能エネルギー産業のグローバル活動の制度的振興及び 制度上の阻害要因の除去などの提言をしている。緊急のファンディングの 必要性が生じたときも、例えば今回の iPS 細胞の発見を受けて、緊急に支 援する体制を全政府あげて行うべきだと提案したのは科学技術振興機構 である。今回、いただいた指摘は、様々な形で提案の中に組み込んでいき たい。

●質疑・討論 応用と基礎をつなぐ視点を

C 光合成の分野では、スーパールビスコやカタラーゼなどの研究がされ てきたものの、実用にはなかなかつながっていかない。科学技術振興機構 には、応用と基礎をつなげる広い視点を期待したい。応用と基礎の連結が、 科学の発展、日本の発展になると考えている。また、広い視野をもつ研究 者が、学会の枠を超える形でワーキンググループを形成して、大局的な観 点を示していくようなことがあるとよい。

●質疑・討論 基礎的研究への支援

- C 基礎的な研究の成果があれば、藻類の研究も一挙に進展する可能性が ある。しかし、基礎的なファンディングに対して、文科省ですら厳しい姿 勢であるという話もある。藻類の遺伝子組換えのように、企業がみずから は手を出せないような分野を研究者が提案し、国が支援するというのも一 つの方法ではないだろうか。
- C ボツリオコッカスの遺伝子組み換えでは、基礎となる遺伝子導入を通

●質疑・討論 文部科学省のファンディング姿勢

- C 文部科学省は、ゲノム解読などの方面にファンディングをこれ以上しない印象に見える。次世代でもゲノムなどのリソースを充実させていかなければ、バイオ燃料の議論もできないと考える。
- C データベースを構築するということだけを目的とした研究では、予算を付ける理由を付けにくい。何かの開発のために必要だという理由を付けることで、支援していきたい。

●質疑・討論 エネルギー・環境問題の緊急性

C エネルギー・環境の問題は緊急性が高い。人材育成も、国際連携も急務となっている。研究も緊急性の高いことから着手していくことを期待している。

横山伸也(東京大学)

陸上生物、藻類、海洋生物の各方面から提案がありバランスがとれた議論となった。妥当性のある提案を作れる気がしている。

田中一宜(科学技術振興機構)

今回のワークショップは、文部科学省もあまり取り上げなかったバイオマスをテーマにした。環境問題は重要であり、中長期的な観点から基盤的問題を抽出したいというのが主な目的だった。文部科学省、経済産業省、農林水産省などが共通のテーブルに着き、日本全体のシナリオを描いていくことが今後なされていくだろう。全体のシナリオの中で、今日の議論をもとに、その元となるようなシナリオを描いていきたい。今後も参加者皆様の協力をお願いしたい。

5.4 セッションⅢの記録

本ワークショップにおいては、各セッションでのプレゼンテーション、 質疑応答、さらに討論の要点を柳下立夫氏(産総研)が逐次記録し、必 要に応じてコーディネータ等が参照できるようにするとともに、各セッ ションの最後に参加者全員に提示することによって、WSで交換された 情報・意見を確認し、さらなる討議にも資するようにした。以下に、本 セッションⅢ「総合討論」に関するその記録内容をまとめて記す。

第1講演者 松永是(農工大)マリンバイオによる燃料生産への期待

- ○バイオ燃料研究の3つのピーク 1970年代、1990年代、2000 年代後半
- ○藻類の屋外培養は既に実用化(サプリメント、化粧品等)
- ○海藻資源 バイオマスの利用要件に合う 日本の技術力が高い
- ○海藻からのバイオエタノール・バイオディーゼル牛産
- ○電源開発:海洋カルチャーコレクション
- ○オイル収率はパーム油より高い
- ○ヤマハ発動機のバイオリアクター:アスタキサンチン生産
- ○海洋での利用:凝集、浮遊単体を用いた培養法の確立
- ○将来的には、海の生態系を回しながらエネルギー生産

質疑

- ・海洋表層培養について
 - →CO₂固定というよりは直接エネルギー利用を目指したい

第 2 講演者 大聖泰弘(早大) 自動車用バイオ燃料の利用と普及に 関する現状と課題

- ○新燃料・エネルギー車の普及条件:信頼性 石油代替性 安定的供給 リニューアブル 利便性・搭載性 従来の燃料・エンジンとのコンパテ ィビリティ
- ○技術的な課題はない
- 〇ハイブリッド車
- ○2050年に運輸部門で7割のCO₂排出削減が可能では? カーライ フスタイル変更
- ○脱石油時代での燃料の利用

質疑

- ・ディーゼル車
 - →今後、ディーゼル車が徐々に普及か 後処理技術の開発
- ・電気白動車
 - →現状、リチウムイオン電池を利用しているが、2030 年以降の展望がない それ以降は燃料電池自動車か 燃料電池自動車に関してはインフラの問題がある
- ・含水エタノールの利用
 - →腐食問題
- ・エタノールに研究費が流れている 化成品への利用が重要

総括

- ○陸生・水生の枠を超えた議論
- ・硫酸法に対して酵素糖化のメリット
 - →希硫酸: セルロースを完全に利用するのは困難 濃硫酸: 技術的に成熟 コスト低下が難しい。酵素糖化は技術開発の余地がある。酵素糖化はバイオリファイナリー的なファクターもある。
- ・色々な技術の統合 システムとしての観点(廃棄物を処理する観点もある)
- ・足りないファクターを如何にカバーするか 土地、水、温度 〇海外的な観点
- ・グランドデザイン 原料の限界 原料費・集荷・ハンドリング 実用 化・産業化へのロードマップ
- ・2030 年では、海外での生産、日本での利用は難しいのでは 基盤 技術の確立が重要
- ・米州、欧州に対抗してアジアでまとまる必要性
- ○夢のあるデザイン
- ・日本は国際協力、国際戦略が非常に弱い コミュニケーションの確立 学会の利用 基盤的な観点が必要
- ・分散型のニーズ エネルギーセキュリティ・エネルギー自給→国際協力・共同研究
- ○コストの視点を離れたバイオマスの利用について
- ・JST CREST で何をしてもらいたいか?サイエンス的な意見として
- ・セルロソーム・セルラーゼの研究者と植物学(細胞壁構造)の研究者 との共同
- ・研究費の流れ:植物(多様性の方が重要では! 全て)→人(複雑 タ

ンパクに重点)ではあるが、代謝産物が制御しているのでは?なにより 人の健康よりは地球の健康

- ・システムバイオロジーを含めてバイオ燃料生産を切り口として、さ まざまな分野の統合
- ・次々世代の技術の方向性
- ・人材育成ができるファンディング グローバルな協調・ファンディン グ統合技術への指向
- ・グローバル的な視野・ファンディングに関しては、既に提言を出して いる
- ・応用←→基礎の両方向の架け橋の制度
- ・リスクはあるが必要性←国の関与
- ・緊急性

6. ワークショップのまとめと考察

6-1 ワークショップのまとめ

本ワークショップ(WS)では、地球温暖化の有力な抑制技術である自然エネルギー有効活用技術の一環として、世界的に化石燃料の代替となりうる、同時にカーボンニュートラルなエネルギー資源として、国として重点的に取り組む必要がある次々世代バイオマス資源化技術開発として「微小生物を活用したバイオ燃料生産基盤技術」を取り上げた。

具体的には、(1)「陸生微小生物を活用するバイオ燃料生産の可能性」、(2)「水生微小生物(微細藻類)を活用するバイオ燃料生産の可能性」を取り上げ、現在世界で注力されているセルロース系エタノール生産技術開発を凌駕する新たなバイオ燃料生産技術開発基盤の創生を目指し、それぞれの最重要課題や相互に融合した新たな展開の可能性に関し、実用化研究や産業化の最先端にたたれるコメンテータの方々を交え、討議を行った。

本WSに先立ち、講演者及びコメンテータの方々に、事前アンケートとして「取り組みの視点」、「考慮すべき具体的な事項」、本WSの課題に関し「国が投資すべきと考える研究課題」、さらに上記項目(1)および(2)に関する仮説を設定し「仮説の妥当性」や「実現時期」また「ボトルネックやブレークスルー研究開発」に関する見解の記述を求めた。

このプレリサーチについては、別途 Appendix に示すが、WS に先立ち 講演者やコメンテータの方々にその詳細説明と提示を行い、WS 開催目的 の明確化を図り、以降の発表・議論及び論点に関しその焦点の明確化につ なげた。なお、6月18日米国で開催された DOE 傘下の3バイオマス関 連研究所の講演で「オミクス技術である、ゲノム、プロテオーム、メタボ ロームを総動員し、システム生物学的なアプローチで、セルロース・エタ ノール生産に最適なエネルギー作物とバイオマス・セルロースを処理する 微生物と酵素群を遺伝子操作でデザインするという戦略」(出典: http://blog.nikkei.co.jp, 2008/06/19) が述べられたと記載がある。 まさに期を同じくして開催された本 WS でも、世界最先端を行くメタボロ ミクス解析技術をはじめとするオミクス技術を利用した生物工学的なア プローチの提唱が発表・討議されるなど、本 WS で取りあげた次々世代バ イオマス資源技術開発課題が、世界のバイオマス研究の大きな潮流の最先 端課題であり、特に水生微小生物(微細藻類)への適用はまだ世界的にも 実施されていないことから、今後の国の投資により、国際的リーダーシッ プをとれる分野であることが明らかになった。

6.2 CRDS の考察

ワークショップの結果を踏まえ、CRDS の自然エネルギーの有効活用 プロジェクトチームでは、微小生物を活用したバイオ燃料の生産技術を俯 瞰的に展望するとともに、今後わが国として推進すべき基礎研究レベルの 重要研究領域の抽出を試みた。特に今回は、微細藻類による新しい燃料生 産系の構築を視座に、「陸生微生物を活用するバイオ燃料生産」の先端技 術と「水生微小生物(微細藻類)を活用するバイオ燃料生産」の知見との 融合研究の抽出を検討した。

抽出にあたっては、まず現行のバイオ燃料生産研究の俯瞰マップを作成 し、ファンディングの現状を明らかにした(図6-1)。すなわち、研究 材料を大きく陸生微小生物と水生・海洋微小生物(微細藻類)にわけ、陸 生微小生物に関しては横軸に、生産プロセスの重要項目として、「前処 理」・「糖化」・「糖化後処理」・「エタノール発酵」・「濃縮脱水」を、また水 生・海洋微小生物(微細藻類)については「育種・培養」・「分離技術」・「残 渣処理・利用」を設定した。さらに、縦軸には陸生微小生物と水生微小生 物(微細藻類)に共通の項目として、「システム」・「プロセス技術」・「基 礎」、そして「共通基盤技術」を設定し、俯瞰的に課題を列挙した。

			阻	生微小生	栁		水生	·海生微小	、生物
		前処理	糖化	糖化後処理	エタノール発酵	濃縮•脱水	育種·培養	分離技術	残渣 処理·利用
シ	ステム	・前処理システム	•酵素反応リアク ター		・固体発酵リアクター	・省エネルキ・一濃縮・脱水システム	・大型培養シス テムの設計(開 放形、閉鎖 系)	・連続処理システムの設計	・糖有効利 用、およびN・ Pミネラル再利 用システムの設 計
_	ロセス 技術	・リゲニンの分解・ 溶出 ・ハミセルロースの 低分子化 ・セルロース結晶 型の変換	・セルラーゼ・成分 量比の最適化 ・糖化酵素生産 性向上技術 ・併行複発酵処 理条件の最適 化	発酵阻害物の	·残渣·副産物	・膜による選択 的分離、脱水 技術	・太陽光を有 効利用する 閉鎖型フォトパ イオリアクター	・連続処理 (乾燥・抽出・ 分離)	・へミセルロースの 低分子化(酸 触媒) ・セルロース結晶 型の変や型破 ・省法 砕 ・谷法
:	基礎	・植物細胞壁構 造状態の解析 ・発酵阻害物生 成機構の解明 ・リゲニン等利用 技術	・高活性酵素の 探索 ・セルラーゼ・成分 量比の最適化 による糖化効 率向上 ・酵素生産性の 向上		・資化性の拡大 ・高温発酵微生 物の開発 ・阻害物耐性微 生物の開発 ・対糖収率向上	・脱水用膜素材 の探索	・増殖及び生産化に登場では、一番では、一番では、一番できる。 できる いっぱい かいい かいい かいい かいい かいい かい かい かい かい かい かい	・環境調和型抽出剤の開発・含有N化合物除去技術の開発・リン脂質の改質(ハイオディーセル化等)	・残渣成分の 分析と構造状 態の解析
	共通 盤技術			ゲノ 酵素の改変・引	ム情報活用(パイス 食化(タンパク質エ	・ /ム、メタトランスクリプト トインフォマッティクス) 学、進化分子エ学 エ学、ミニマムゲノム	单的手法)		
	投資が行 いている	今後の投資 必要	が						

図6-1微小生物を活用したバイオ燃料生産研究の俯瞰とファンディング状況

その結果、代表的な陸生バイオ燃料生産系であるエタノール発酵システムについては、多くの要素技術について、例えば本年度委託された NEDOの「加速的先導研究」や「中長期的先導研究」で既に投資が始まり、基礎研究から技術・システム開発に至るほとんどの研究開発が進行中であることが確認された。一方、今後進展が予測される DNA の人工合成を中核技術とした合成生物学的なアプローチについては、これまでにない新しい微生物の構築が理論上可能であることが証明されてはいるものの、ゲノム情報の基本的な設計技術や組換え技術など、未着手の課題が多いことから、重要領域として今後の投資が必要であると結論付けた。

また、水生・海洋生物を対象とした燃料生産研究については、大型藻類のみならず、これまで軽油や重油を蓄積する微細藻類についても研究開発が実施されており、そのいくつかについては、既に実証実験が行われコストを下げる技術開発のフェーズにある。しかしながら、これら微細藻類を活用した新規バイオ燃料(ガソリン、水素等)研究に関しては、ほとんどの課題が手付かずとなっており、今後の国の投資により、多くの成果が創出される可能性があることが示唆された。例えば、燃料生産菌の代謝メカニズムの解明や光合成能の向上に関する研究については基礎研究レベルにおける研究投資が十分とは言い難く、これらの研究開発への投資により新規燃料開発や生産効率を飛躍的に高める技術が確立されることが期待された。

以上の結果に基づき、CRDSでは、暫定的に新規バイオ燃料に関する研究開発を以下のようにとりまとめた。

(1) バイオ燃料生産微生物の人工合成技術の開発

(具体的な研究課題例)

- ・微牛物代謝物のプロファイリング解析
- ・細胞における代謝変動予測システムの開発
- ・人工代謝経路のインシリコデザイン技術の開発
- ・細胞の耐性強化技術の開発

(2) 天然微細藻類の燃料生産機構の解明

(具体的な研究課題例)

- ・炭化水素産生藻類の比較ゲノム解析
- ・藻類における燃料代謝経路の解析
- ・光合成藻類における光受容および炭酸固定機構の解明 また、上記2課題の知見や技術の融合による新規多機能藻類の創製の可

[1]

能性についても検討を行った。その結果、陸生微小生物の研究で、今後進 展が予測される DNA の人工合成を機軸とした合成生物学的なアプロー チについては、将来、水生・海生微小生物(微細藻類)へ展開することが 可能であることから、新技術の創出によりこれまでにない有用な藻類が創 製されると判断した。例えば、藻類には光合成機能を有する種が多く発見 されていることから、このような機能と燃料生産系を付与することにより 二酸化炭素を吸収する燃料生産菌の開発が可能となる。また、微生物には 重金属やダイオキシン等の有害物質を分解・蓄積する環境修復機能をもつ 種が存在することから、これらの機能を燃料生産菌に導入し、沿岸域で展 開することも考えられる。

よって、上記2課題に加え、下記1課題を重要課題として抽出し、結果 を図6-2に示した。

(3) バイオ燃料生産多機能藻類の創製

(具体的な研究課題例)

- ・人工代謝経路の藻類への導入技術の開発
- ・バイオ燃料の高濃度蓄積藻類の創製
- ・燃料生産および炭酸ガス固定能を向上させた多機能藻類の創製

		哲	陸生微小生物	参		水生・	水生-海生微小生物	生物
	前処理	糖化	糖化後処理	麺装ルーノダエ	濃縮•脱水	育種·培養	分離技術	残渣 処理·利用
システム	・前処理システム	・酵素反応リアクター		・ 	・省エネルキ、一濃縮・脱水システム	・大型培養シス テムの設計(開 放形、閉鎖 系)	・連続処理システムの設計	・糖有効利 用、およびN・ Pミネラル再利 用システムの設計
プロセス技術	・リゲニンの分解・ 溶出 ・ヘミセルロースの 低分子化 ・セルロース結晶 型の変換	・セルラーゼ、成分 量比の最適化 ・糖化酵素生産 性向上技術 ・併行複発酵処 理条件の最適 化	·酵素の回収・ 再利用 ・発酵阻害物の 除去 ・糖化液の濃縮	・連続発酵・高密度充填プ・ロセス・現産・副産物の処理・利用	・膜による選択的分離、脱水技術の天然機を受える機能にある。	・太陽光を有 効利用する 閉鎖型フォトバ イオリアクター	·連続処理 (乾燥·抽出· 分離)	・へきセルロースの 低分子化(酸 触媒) ・セルロース結晶 ・セルロース結晶 型の変換 ・省エネ型破砕法
基礎	・植物細胞壁構造状態の解析・発酵阻害物生 ・発酵阻害物生成機構の解明・リケン等利用 技術	・高活性酵素の 探索 ・セルラーゼ成分 量比の最適化 による糖化効 率向上 ・酵素生産性の	①	・資化性の拡大 ・高温発酵微生 物の開発 ・阻害物耐性微 生物の開発 ・対糖収率向上	おける際 特の解明 ・脱水用膜素を の探索	・増殖及び生 産能に優れ た培養株の 育種 ・アルが耐性 ・深類の開発 ・燃料代謝経 路の解析	·環境調和型 ・環境調和型 ・含す N化合 ・含有 N化合 物除去技術 の開発 ・リン脂質の改 ば (ハイオディー だ ル化等)	・残渣成分の分析と構造状態の解析
共 基盤技術			新規遺伝 ゲル 酵素の改変・強 微生物の改	新規遺伝子源探索(メタゲノム、メタトランスクリプトーム) ゲノム情報活用(バイオインフォマッティクス) 酵素の改変・強化(タンパク質エ学、進化分子エ学的手法) 微生物の改変・強化(ゲノムエ学、ミニマムゲノム手法)	ム、メ外ランスクリプト- インフォマッテイクス) さ、進化分子工学 C学、ミニマムケブム ⁵	-4) 5的手法) 手法)	(O)	③バイオ燃料生産多機能薬類の創製

今後の投資が 既に投資が行 われている

現在のバイオ燃料研究は、微生物や酵母などの陸生微小生物を活用したエタノール生産が主流となっており、一部の基礎研究を除いてほぼ網羅的に投資が行われている。 一方、水生微小生物についてはバイオディーゼルの生産システムの開発ブロジェクトが進行してはいるものの、バイオガソリンなど新世代バイオ燃料に関する研究開発はほ とんどが未着手となっている。これらの結果から、CRDSでは投資対象課題のうち、技術が成熟しつつある①微生物等の人工合成に関する研究課題と新たな発見により今後 の展開が期待される②燃料生産薬類の機能解明に関する課題、そして①と②の融合による③新規多機能薬類の創製に関する課題、を重要領域として抽出した。 図6-2俯瞰マップから抽出された重要研究課題

Appendix1

開催日時、場所

2008年 7月 5日(土) 10:00-18:00 研究開発戦略センター 2階大会議室

プログラム

趣旨説明

主催者挨拶(WSの目的と期待するアウトプット)

田中一宜

コーディネーター挨拶

横山伸也

趣旨説明及び議論(アンケート・仮説の結果説明を含む)

川口 哲

セッション I 陸生微小生物を活用するバイオ燃料生産の可能性

次世代セルラーゼの開発(NEDOでの取組を含む)	森川	康
バイオリファイナリーに向けてのリグニン生分解系解析	渡辺	隆司
と分解触媒開発の重要性		
バイオマス全てを有効利用するための革新技術	松村	幸彦
最新メタボローム解析技術と今後の開発課題	柴田	大輔
合成生物学の重要研究課題	近藤	昭彦
クローズド発酵サイクルの重要研究課題	福崎	英一郎

討論・セッション [まとめ

横山伸也・柳下立夫

セッションⅡ 水生微小生物(微細藻類)を活用するバイオ燃料生産の可能性

具体的な藻類利用技術開発概論	原山 重明
緑藻類からのバイオディーゼル生成技術と重要研究課題	渡邉 信
光合成利用微生物の培養技術と重要研究課題	都筑 幹夫
大型藻類の利活用技術と展望・戦略	能登谷 正浩

討論・セッションⅡまとめ

原山重明・柳下立夫

セッション皿 総合討論

マリンバイオによる燃料生産への期待	松永	是
自動車用バイオ燃料の利用と普及に関する現状と課題	大聖	泰弘

討論・セッションⅢまとめ

横山信也・原山重明・柳下立夫

総括

WS総括

横山信也・柳下立夫

閉会

田中一宜

Appendix 2

アンケート[プレリサーチシート]

WS 参加者の知恵を有効に活用し、WS 当日の限られた時間内に有意義な成果を上げるため、事前に本アンケート[プレリサーチシート]にご回答いただき、CRDSでとりまとめて参加者に配付します。(配付にあたってご回答者名を匿名を希望される方は、2. -4. の記入者名の所定欄に〇をお付けください)

1. 先生ご自身について

本WSの参加者は大変広い分野にわたっているため初対面に近い方がおられます。他方、時間配分上、自己紹介の時間を十分にとることができません。そこで、参加者相互のご理解のため、WEB等から下記のような情報を含む資料を作成し参加者に配付する予定です。下記項目にご回答(あるいは関連資料をご教示)いただければ、資料作成の際に使わせていただきます。

- (1) ご略歴
- (2) ご専門
- (3) 主要ご業績
- (4) 現在のご興味

2. WS 全般に関して

本WSにおいては、「微小生物を活用したバイオ燃料生産基盤」の個別技術についてのディスカッションにとどまらず、『環境問題への正負の影響』、『必要な面積の問題』、『実用的バイオ燃料製造に至るシステム的課題』、『競合他技術との関係』、『日本のポテンシャルと世界での位置付け』、『基盤的研究開発の体制』、『異分野の融合』等々、広いあるいは高い観点からの俯瞰的、戦略的議論も期待しております。例えば、燃料生産コスト自体の深い検討は現時点では困難としても、本質的な問題が想定できるとしたらその議論も重要です。

- 2-1. こういった広いあるいは高い立場として、どのような視点が重要でしょうか?
- **2-2.** 2-1. に関して、考慮すべき具体的な事項と、それについてのお考えのご記述願います。

3.「微小生物を活用したバイオ燃料生産基盤技術」について、国が投資すべきと考える研 究課題

(ご回答者名: 参加者配布時に、A. 名前を出してよい、B. 匿名希望)

, , , , , , , , , , , , , , , , , , , ,		
研究課題名*		
*個人研究ではなく、複数のPIによるチーム研究を		
お考え下さい。		
提案の内容		
バイオマス原料の微小生物による変換や残渣利用、微		
小生物におけるバイオ燃料の直接生産において公的		
資金の投入が必要と思われる具体的な研究開発につ		
いてご記述下さい。		
また、作成にあたっては以下の点を念頭に置いてご記		
述下さい。		
・我が国のポテンシャル		
・諸外国の動向(強み、弱み)		
・5年後、10年度、15年後に期待される成果		
 投資の必要性		
下記項目を参考にご記入下さい		
・我が国が行う必然性(緊急性、産業界のニーズ、当		
該分野の国際競争力など)		
・既存研究との関連、差異		
・国内外の情勢		
 本領域の研究推進方法		
・・ハー・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・		
形成研究、予算規模、研究期間など		

4. WS 仮説

WS での議論を促進するため、CRDS では WS のテーマに関して設定した「仮説」につ いて議論を進めるという討議方式を採用しております。つきましては、本 WS の各セッシ ョンに関する以下の「仮説」についてご回答をお願いします。ご専門から全く外れるよう な場合には白紙回答でも結構ですが、非専門の方のコメントも大変貴重ですので可能な限 りご記入をお願いします。

4-1.「セッション! 陸生微小生物を活用するバイオ燃料生産の可能性」に関する仮説

記載欄の(1)(2)に関しては、以下によりアルファベットのいずれかに〇をお付けください。

- (1) 仮説の妥当性 A: 妥当である B: 妥当とは言えない C: どちらとも言えない
 - (2) 実現できる時期 A:中期 2015~2030 年 B:長期 2031~2050 年

(ご回答者名: 参加者配布時に、A. 名前を出してよい、B. 匿名希望)

(0000.		<i></i>		
ワークショップで検	(1)	(2)	仮説実現に至までの	ボトルネックをブレイ
証する仮説	妥当性	実現	ボトルネックは?	クスルーするための研
		時期		究開発は?
①糖化・発酵プロセス	Α	Α		
として廃棄物を最小	В	В		
限にするクローズド	С			
システムが確立する				
②次世代セルラーゼ	Α	Α		
の大量生産が可能に	В	В		
なる	С			
ワークショップで検	(1)	(2)	仮説実現に至までの	ボトルネックをブレイ
証する仮説	妥当性	実現	ボトルネックは?	クスルーするための研
		時期		究開発は?
③バイオマス資源の	Α	Α		
100%有効利用が可	В	В		
能になる	С			
•	•			

④他分野で使用され	Α	Α
ているメタゲノム、メ	В	В
タボロミクス、メタボ	С	
ローム等の解析法の		
適用が本研究開発に		
本格的に導入される		
⑤合成生物学の導入	Α	Α
により新しい有効微	В	В
生物の創製ができる。	С	
かつバイオ燃料を体		
内に蓄積できる陸生		
微小生物を創製でき		
る		

4-2.「セッションⅡ 水生微小生物(微細藻類)を活用するバイオ燃料生産の可能性」 に関する仮説

記載欄の(1)(2)に関しては、以下によりアルファベットのいずれかに〇をお付けく ださい。

(1) 仮説の妥当性 A:妥当である B:妥当とは言えない C:どちらとも言えない

(2) 実現できる時期 A:中期2015~2030年 B:長期2031~2050年

参加者配布時に、A. 名前を出してよい、B. (ご回答者名: 匿名希望)

ワークショップで検証	(1)	(2)	仮説実現に至までのボ	ボトルネックをブレ
する仮説	妥当性	実現時	トルネックは?	イクスルーするため
		期		の研究開発は?
⑥軽油や重油等を多量	Α	Α		
に蓄積する有効な藻類	В	В		
が開発される	С			

⑦微小生物・大型藻類	Α	Α
を大量培養・栽培技術	В	В
が完成し、エネルギー	С	
収支の高い、資源化が		
可能となる		
8海洋を使用した環境	А	Α
低負荷型の生産システ	В	В
ムが構築される	С	

<6月25日(水)午後5時までにご回答下さい。回答先:〈O7O5jstws@sntt.or.jp〉 >

Appendix 3

本ワークショップ参加者一覧

コーディネーター

横山 伸也	東京大学	大学院農学生命科学研究	教授
		科 生物・環境工学専攻	

スピーカー

近藤 昭彦	神戸大学	大学院工学研究科 応用	教授
		化学専攻	
柴田 大輔	かずさDNA研究所	産業基盤開発研究部長	部長、センター
		かずさバイオ共同研究開	長
		発センター長	
都筑 幹夫	東京薬科大学	生命科学部 環境ゲノム	教授
		学科環境応答生物学研究	
		室、東京薬科大学大学院	
		生命科学研究科	
能登谷 正浩	東京海洋大学	海洋科学部 海洋生物資	教授
		源学科 応用藻類学研究	
		室	
原山 重明	中央大学	理工学部 生命科学科	教授
福崎英一郎	大阪大学	大学院工学研究科 生命	教授
		先端工学専攻	
松永 是	東京農工大学	理事・副学長(学術・研究	理事・副学長・
		担当)	教授
松村 幸彦	広島大学	大学院工学研究科 機械	教授
		システム工学専攻、バイオ	
		マスプロジェクト研究セ	
		ンター	
森川 康	長岡技術科学大学	工学部 生物系	教授
渡辺 隆司	京都大学	生存圏研究所 生存圏診	教授、センター
		断統御研究系 バイオマ	長
		ス変換分野、生存圏学際萌	
		芽研究センター	

渡邉 信	筑波大学	大学院生命環境科学研究	教授
		科	

コメンテーター

井上 義夫	東京工業大学	大学院生命理工学研究	教授
		科 生体分子機能工学	
		専攻	
香取 義重	株式会社三菱総合研究所	科学技術部門 統括室	参与
澤一誠	三菱商事株式会社	イノベーション事業グ	シニアマネージ
		ループ 新エネルギ	ヤー
		ー・環境事業本部 新	
		エネルギー事業第二ユ	
		ニット(バイオエタノ	
		ールチーム)	
大聖 泰弘	早稲田大学	創造理工学部・研究科	教授
		総合機械工学科	

セッションまとめ

柳下	立夫	(独) 産業技術総合研究所	バイオマス研究センタ	主任研究員
			ー バイオマスシステ	
			ム技術チーム	

その他の参加者

阿部 義男	文部科学省	研究振興局 基礎基盤	調査員
		研究課 ナノテクノロ	
		ジー・材料開発推進室	
河本 洋	文部科学省	科学技術政策研究所	特別研究員
山口 智彦	(独)新エネルギー・産業	ナノテクノロジー・材	プログラムマネ
	技術総合開発機構	料技術開発部	ージャー
西村 睦	(独)物質・材料研究機構	燃料電池材料センター	センター長
小嶋 典夫	(独)物質・材料研究機構	理事長室	室長
平原奎治郎	(独)物質・材料研究機構	ナノテクノロジー拠点	室長
		運営室	
記村 隆章	ナノテクノロジービジ		事務局長代理
	ネス推進協議会		

(独)科学技術振興機構	研究開発戦略センター	上席フェロー
(独)科学技術振興機構	研究開発戦略センター	特任フェロー
(独) 科学技術振興機構	研究開発戦略センター	フェロー
(独) 科学技術振興機構	研究開発戦略センター	特任フェロー
(独) 科学技術振興機構	研究開発戦略センター	フェロー
	(独)科学技術振興機構	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター

ワークショップ企画メンバー

田中 一宜	上席フェロー	物質・材料ユニット
		ナノテクノロジーユニット
石原 聰	フェロー	物質・材料ユニット
石森 義雄	フェロー	ナノテクノロジーユニット
大川 令	フェロー	環境技術ユニット
川口 哲	フェロー	ライフサイエンスユニット
豊蔵 信夫	フェロー	ナノテクノロジーユニット

※お問い合わせ等は下記ユニットまでお願いします。

科学技術未来戦略ワークショップ

「自然エネルギーの有効利用~材料からのアプローチ~」 微小生物を利用したバイオ燃料生産基盤技術

報告書

CRDS-FY2008-WR-03

独立行政法人科学技術振興機構

研究開発戦略センター

平成 20 年 11 月 物質・材料ユニット

〒102-0084 東京都千代田区二番町3番地

電話 03-5214-7483

ファックス 03-5214-7385

http://crds.jst.go.jp/

©2008 JST/CRDS

許可無く複写/複製することを禁じます。 引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

