

第17回バイオマス関連部会・研究会合同交流会 参加報告

日本木材学会 バイオマス変換研究会 代表幹事
北海道大学 大学院農学研究院 幸田圭一

筆者は、前任の上高原 浩先生（京都大学 大学院農学研究科）の後を受け、バイオマス変換研究会の代表幹事をこの4月より2年間の予定で仰せつかっています。

このたび、2017年（平成29年）12月5日に東京・湯島の全国家電気館において第17回バイオマス関連部会・研究会合同交流会が開催され、これに参加しましたので、研究会の活動報告の一環として本誌紙面をお借りしてご報告する次第です。この合同交流会は、バイオマス関連学協会の部会・研究会（6団体：下記※注1）が共同主催者となって年に一回開催されるもので、実際には各団体が1年ごとに世話人担当を交代しながら運営しています。今回の世話人は化学工学会エネルギー部会バイオマス分科会の松村幸彦先生（広島大学 大学院工学研究院 教授）でした。

恒例により、お昼に3階の小会議室で幹事会（各幹事の自己紹介と前年度〔第16回〕合同交流会の決算報告等）を行ない、その後、1階にあるやや広めの会場（100人収容規模）に部屋を変えて合同交流会が始まりました。なお参加者は、合同交流会の実施概要の決定が遅れ、情宣が不十分だったこともあり、例年よりやや少なく33名（14時現在）でした。

最初に13:00~14:00まで、各団体が持ち時間9分で、自団体の概要紹介とこの1年間の活動報告を行いました。筆者も日本木材学会のバイオマス変換研究会の立場から報告しました。バイオマス変換研究会の活動報告を行なうに先立って、木材学会全体の説明（設立趣旨、歴史、会員数、委員会・研究会などの組織数、主な活動など）を行ないましたが、その際、強調したのは最近の会員数の推移についてです。多くの学協会が特に西暦2000年ごろ以降は徐々に会員数を減らしていく傾向がある中で、日本木材学会は最近数年間、むしろ会員数が増加傾向にあること、とりわけ、学生向けの入会キャンペーンが功を奏しているためか、最近では年に2桁の学生会員増となっていることが全体の会員増の主要因であること、を中心に報告しました。これは、筆者も今年度、研究会理事の一人として関わった日本木材学会北海道支部・創立50周年記念事業（2017年7月20日開催：於 北大農学部大講堂）においてご講演頂いた、本学会副会長の船田 良先生（東京農工大 大学院農学研究院）が強調しておられた点を意識したものです（下記※注2）。特に学生数の増加については、少なからず、他学協会に所属する会場の聴衆に驚きをもって受け止められたようです。

各団体の活動報告が一通り終わった後、14:00よりメインの講演会に移りました。今回の全体テーマは「海洋・水生バイオマス利用の最先端」でした。他のバイオマス関連学協会ではやや取り上げにくいテーマながら、世話人である松村先生も研究プロジェクトの中核的主体として深くかかわっておられます。そこで、「水生・海洋バイオマス」（成長速度の速い緑藻・紅藻・褐藻類とそれらが生み出す有機物）の研究・利用に関し、大学や産業界の一线でご活躍されている5人の先生方をお招きしての講演会を開催する運びとなりました。

一人目の講演者は筑波大学、藻類バイオマス・エネルギーシステム開発研究センター（ABES）教授の渡邊 信先生で、「微細藻類の生産と利用」と題したご講演でした。冒頭、先生が所属されている筑波大学のABES（設立2015年）の紹介と、関連して2010年の藻類産業コンソーシアムの設立過程に言及されました。その流れが、石油資源に依存せず、微生物や生体触媒を利用した化成品・燃料の創出を目指す「ホワイトバイオテクノロジー」に注目が集まっているところから来ていること、また、東日本大震災からの復興の基本方針（2011年7月29日：東日本大震災復興対策本部〔復興庁の前身〕）の中に「再生可能エネルギーの拠点整備」が盛り込まれ、地震被害が大きかった東北沿岸地域の復興が強く要望されており、このことがさらに当該沿岸地域において藻類を利用する産業集積を後押ししていることが紹介されました。次に、オーストラリアなど既に沿岸地域を利用して大規模な微細藻類の生産を行なっている地域と比べた場合の日本における技術的課題について述べられ、十分な太陽光

(日照時間)、生育に適切な気温、広いスペースが必要であること、その課題の解決のためには、大胆な発想の転換が必要であったこと、具体的には、バイオマス生産性が高いいわゆるエリート藻類（ミドリムシ、ナノクロロプシス、ポトリオコッカス：約 40 kg/m²/day がチャンピオンデータとのこと）の生育にとって好適な環境条件を技術的に整備することよりも、その地域の気象・環境条件で生育する雑藻類を増やす技術の改善がポイントであったことについて説かれました。その後、先生が携わっておられる開発研究の事例について触れられ、土着藻類を用いた生産性向上のための培養条件（水深、季節、太陽光不足による炭素源を補うための酢酸の添加など）の検討過程が紹介されました。藻類は、正味のバイオマス乾燥重量に対するオイル分の含量が少なく、圧縮脱水による減容化を行なってもなお抽出効率が悪いこと、水熱処理により生産性の向上を図っていること、その水熱処理の際に副産物として出てくる酢酸を、さらに藻類の培養に再利用することも紹介されました。最後に、ポトリオコッカスが生産する炭化水素（C₃₄H₅₈）の利用について触れられ、保湿剤としての利用や抗ストレス作用について言及されました。

最初のご講演で言及のあった「ポトリオコッカス」の生産物に特に焦点を当てて「微細藻 *Botryococcus braunii* による炭化水素生産」というタイトルで、技術面から詳細なお話を展開されたのが、二人目の講演者である長谷川文生先生（東京大学 大学院農学生命科学研究科）でした。淡水域に生育する緑藻類の一種である *Botryococcus braunii* は、数種類の炭化水素（アルカジエン、アルカトリエン、トリテルペン、テトラテルペン類が主体とのこと）を生産して自身の細胞外マトリクス部に蓄積するため藻体の約 70%を炭素分が占め、他の藻類の約 2 倍 (36 MJ/kg) の熱量を持っていると言われていています。藻体から取り出した炭化水素類は溶媒抽出などの生成過程を経て色素類を除去した後、利用されますが、そうした炭化水素生産プロセスに関わる研究技術開発の歴史的経緯について、話を進められました。すなわち、培養した藻体を脱水し、乾燥過程を経た後、溶媒抽出を行なって炭化水素を取り出す初期のプロセスは 1980 年代に明治大学の（故）岩本浩明先生（応用微生物学）が開発したもので、その後、東京大学の横山伸也先生（現 公立鳥取環境大学）が脱水藻体を乾燥せずに 90~100℃の湿式加熱処理に供することで、より簡便に炭化水素を取り出すことに成功したこと、さらにその研究を受け継いだ講演者の長谷川先生の研究グループが新規に希釈海水で培養することにより、加熱工程までも省略できるに至ったことが順を追って述べられました。ポトリオコッカスの藻体は自身の外側に寒天状の保水バリア層とも呼べる、多糖類の細胞外マトリクスを作り、これが生産した炭化水素類を保持します。そのため、単純な溶媒抽出だけでは抽出効率が悪く、加熱処理によってこの多糖マトリクスを破壊することが以前は必要だったこと、さらなる研究により、本来は淡水域に生育するポトリオコッカスを少量の海水を含む希釈海水培地で培養すると、混合した海水による塩分濃度の上昇に伴って藻体増殖率は下落していくものの、多糖マトリクスを作らなくなるため、藻体を加熱処理しなくても溶媒抽出のみでも炭化水素の回収効率が向上することを見出した（実際上は、藻体増殖率と炭化水素回収効率がトレード・オフする点で利用する）とのことでした。世界では利用可能な淡水域は狭く量的にも限られているため、もし海水中でのポトリオコッカスの増殖が可能ならば生産性が飛躍的に高まるはず、という発想から試行錯誤の上、偶然、この希釈海水培地での増殖可能性を見出した、という研究展開過程が個人的には興味深かったところです。また、希釈海水を使用した培養では、純淡水での培養と比べ、藻体のコロニーサイズが大きくなるため、ろ過分離による藻体の回収にも有利であることにも触れられました。さらにこれらの炭化水素生産プロセスにおけるエネルギー収支（Energy Profit Ratio [EPR]：投入エネルギー1 単位で生産可能なエネルギーの量で値が最低でも 1 を超えないと収支が見合わない）についても言及され、乾燥ありの初期生産プロセス⇒加熱処理ありの生産プロセス⇒希釈海水培養する新規生産プロセス、と年代を経るごとに EPR 値が段階に向上してきていること（各 1.3⇒1.9⇒2.2）についても述べられました。今後の課題として、炭化水素の生産性向上に向けて、安価な窒素源を利用すること、収穫しやすい藻株の育種が重要であること、いわゆる「ミルキング培養」により 1 回の生産プロセスで藻体を死なせずに炭化水素を回収し、さらに再培養により炭化水素を再生産させるプロセスの確立が重要になってくること、さらに藻体からの炭化水素以外の副産物としてカロテノイドや水溶性多糖類の利活用も必要になってくること、といった将来展望で講演を締めくくっていただきました。

三人目の講演者は、産業界から松本光史先生（電源開発 技術開発部）であり、タイトルは「海洋ケイ藻による原・燃料用オイル生産技術開発とその将来像」でした。冒頭部分では、藻類に限らず、木質を含めたバイオマス利用一般に対し、「本当にカーボン・ニュートラルと言えるか？」という問題提起から始まり、どうしても避けられない輸送・加工工程を含めた、サプライチェーン全体でCO₂収支の評価をすべきという、当然第一に意識すべき命題から説き起こされました。微細藻類による「グリーンオイル」の生産に目を移した場合には、株の選定⇒大量培養⇒藻体の回収⇒炭化水素の抽出・精製、といった全プロセスについて低エネルギー化・低CO₂排出型の技術にシフトしていくべき、となりますが、既存の生産技術は、クロレラやスピルリナなど高付加価値有用物質（健康食品・サプリメント）の生産に対応する機器仕様構成にはなっていない、低CO₂排出型で低価格な化学物質やエネルギー（グリーンオイル）の生産には適用できない、という技術的課題について語られました。微細藻類を用いた低CO₂排出型のバイオオイル生産プロセスとしては、年間を通して生産変動が少ないことが望ましいわけですが、日本のような気象条件だと水温変動が技術的なネックとなります。そこで講演者らは、生育水温域が異なる2種の海水珪藻株（冬期の水温〔4~25℃〕で藻体生育と炭化水素生産が盛んな株[*Mayamaea* sp. JPCCTDA0820：通称 ルナリス株；lunar（月）を意味するとのこと]とその逆に夏期の水温〔15~45℃〕で盛んな株[*Fistulifera solaris* JPCCTDA0580：通称 ソラリス株；solar（太陽）を意味するとのこと]を組み合わせることにより、培養槽の攪拌に必要な少量の動力源を除いて培養時のエネルギーや排出CO₂量を低減し、年間を通して7.4 g/m²/dayの菌体生産を実現した、とのことでした。ただし、この培養法にも課題はあり、2年目、3年目と培養を続けていくと、経時的に生産性が徐々に下がり培養バッチごとの生産性のバラツキが顕著になってくることについても触れられました。光合成を利用しCO₂削減効果を有する、このような微細藻類由来のグリーンオイルの生産技術について、2030年ごろの実用化を目指すとしています。ただ、先の講演者も触れたエネルギー収支（EPR）で見ると、オイル自身の熱量を38 MJ/Lとした場合、培養工程でなお6.7 kWh/L oil、回収工程で11~12 kWh/L oilのエネルギーを使用している現状ではEPR値は0.24程度であり、自己凝集技術の確立により回収工程での使用エネルギー量を1 kWh/L oilにまで低減したとしてもEPR換算では0.5程度であると、なかなか厳しい現状が語られました。今後は高濃度培養条件が確立できればエネルギー収支に与えるインパクトが大きい、と述べられました。

引き続き産業界から、四人目の講演者として鈴木健吾先生（〔株〕ユーグレナ 研究開発部長・取締役）が登場され、講演タイトルは「ミドリムシのバイオマス資源としての可能性」でした。鈴木先生は東京大学の大学院生時代に「ユーグレナ」を研究テーマとし、後にこれを社名とする会社を設立して今日は世界的に事業拡大を図っている若手の起業家です。ユーグレナ（属名：*Euglena*）は和名をミドリムシと言い、体長30~50 μm、幅10 μmのサイズを有しており、細胞壁がなく、動植物両方の特徴を持つ（光合成を行なう一方、運動性も有する）鞭毛虫の一種で、O₂不足の生育条件では炭化水素を生産して体内に蓄積する、というユニークな性質を持っています。炭化水素の主体はC₁₄骨格を持つミスチン酸を主体とする「ワックス・エステル」で、バイオディーゼル燃料としての利用が可能であり、市街地でのバスの試験走行など、既に実用化を見据えた実証試験を行っているとのこと、将来的にはジェット燃料としての利用も視野に入れているというお話でした。さらにミドリムシは独自成分として、β-1,3-グルカン（重合度700~750とされる）を主体とする貯蔵多糖「パラミロン」を最大で、自重（乾燥重量）の50%有していることでも知られており、抗腫瘍効果や抗菌・抗ウイルス活性、免疫賦活効果等が報告されています。平成24年度には経産省のサポートインダストリー制度（ものづくり基盤技術）による支援を受け、パラミロン抽出技術の開発と素材・食品への応用を目指しているとのことでした。このようにミドリムシの高付加価値化成品（機能的食品、化粧品素材、医療用素材）から低価格な燃料に至るまでをカバーできるバイオマス資源としてのミドリムシの可能性についてお話いただきましたが、当面は小規模でも事業展開可能なところに狙いを定めているとのことでした。やはり、バイオマス利用一般について言えることですが、安価な燃料としての用途は、事業規模としては大きいものの、相当に安価かつ大量に安定供給できる大規模システムが確立できない限り、非常に前途は厳しいという感を強くした次第です。さらに、最近ではミドリムシを用いた

クッキーなど一般食品としての事業展開、児童を対象に「食育」を意識した企画も行うなど、幅広くご活躍されています。食品としては人口の多い中国や、とりわけハラール認証に敏感な東南アジアでの事業展開に注力しており、後者は宗教上の理由、すなわち豚肉食の禁忌によるビタミン B₁₂ 欠乏に対する対応だという考えを披露されました。最後に、本日締めているのはミドリムシの色素で染めたネクタイであるのご自身の服装について言及され、その穏やかで淡い緑の色調が聴衆の好評を博していました。

最後の五人目の講演者は、中島田 豊先生（広島大学 大学院先端物質科学研究科）であり、タイトルは「大型藻類を徹底的に利用する」でした。中島田先生は、司会の松村先生とともに、広島大学のバイオマスプロジェクト研究センターの中心メンバーとしてご活躍されており、バイオマス等の嫌気発酵プロセスを利用したバイオ燃料やバイオマテリアル生産に関わる様々な要素技術の開発を行なってこられました。今回のご講演では、大型海藻類の発酵による物質・エネルギー生産を中心にご講演頂きました。水産バイオマスの主軸をなす海藻（褐藻類〔コンブ、ホンダワラなど〕、紅藻類〔オゴリノ、テングサなど〕、緑藻類〔アオサ、クロレラなど〕）は、世界の沿岸海域に生育し比較的生産量が多いことから、第三世代バイオマスとして注目されています。この第三世代バイオマスは、食料・陸上農地との競合を避けられる点で第一世代バイオマス（農産物〔可食部〕）と比べて、また、リグニン含量が極めて低いいため利用にあたっての前処理が比較的容易である点で第二世代バイオマス（草本類〔農産廃棄物、間伐材、林地残材〕）と比べて、それぞれ優位性があると考えられています。中でも賦存量が最も多いのが褐藻類であり、自重の約 90%を水分が占めますが、残り 10%の藻体（固形分）のうち、一般的には約 7 割が有機物で残り 3 割が灰分（無機物）です。広島大学の「海洋藻類の発酵制御を基盤とした完全資源化技術の開発研究プロジェクト」では、1) 海洋性無加水メタン発酵技術の開発（研究責任者：中島田先生）、2) 海洋性油脂発酵技術の開発、3) 海洋性廃止処理・資源回収技術の開発、4) 海藻発酵前処理技術の開発（研究責任者：松村先生）、を研究課題の 4 本柱としており、再生可能エネルギー（天然ガス代替メタン）の生産を中心として、副産する有機マテリアル（EPA、DHA、カロテノイドなど）や無機マテリアルの回収も含めた「完全資源化」を目指しているとの概要紹介から始まりました。メタン発酵にはメタン生成能が高い嫌気性細菌の利用が不可欠ですが、中島田先生の研究プロジェクトでは、海洋汚泥から耐塩性のある海洋性酢酸資化メタン生成菌を含む高性能なメタン発酵菌叢を見出し、褐藻類の無加水連続メタン生産を可能にしたとのことでした。メタン発酵には酢酸等の有機酸の存在が不可欠ですが、その後の検討で、有機酸発酵とメタン発酵とを組み合わせた二層式発酵法により、メタン生成速度の改善に成功したとのことでした。バイオマスとして大型藻類を利用するにせよ、エネルギー利用のみでは採算が合わないのが通常であるため、経済性改善を目的として、藻体特有の糖質（マンニトールやアルギン酸など）を原料とした高付加価値油脂発酵のお話が続きしました。なお、ここでターゲットとした高付加価値脂質とは、ドコサヘキサエン酸（DHA）やアスタキサンチン、スクアレンを指します。油脂発酵微生物ラピンチュラ類（オーランチオキトリウム属）はそのままの形では藻類に特有のマンニトールを資化できませんが、フルクトースからの脂質生合成系をそもそも有しており、この脂質生合成系を強化した育種を行ないつつ、マンニトールをフルクトースに変換する *Gluconobacter* と共生系で培養することにより、非組み換え型の油脂発酵法を確立したとのことでした。当初は遺伝子導入も検討されましたが、食品への利用ができなくなる点と、遺伝子組み換え生物の封じ込めにかかるコストが高くつく点を考慮した結果、共生系での発酵技術開発に至ったそうです。なお、中間生成物の、フルクトースは *Gluconobacter* の増殖にも消費されるため、一定の生産量のところで共生系に海水塩を加え *Gluconobacter* の生育のみを抑制することで、高付加価値油脂の生産効率の向上を図っています。最後に藻体の発酵後残渣の処理による資源回収技術についても触れられ、海洋性細菌（*Nitratireducer* sp.）を用いた藻体残渣中の有機酸の油化といった転換技術、ならびに残渣中のレアメタル/レアアースを中心とする重金属の光合成菌による回収技術についてお話されました。やはりメタンのようなバイオ燃料の生産をターゲットとした場合、エネルギー収支は何とかプラスにできても、経済収支は通常は見合わないで、高付加価値生成物の生産と抱き合わせた形で残渣の有効利用を図ることで、なんとかコスト面の改善を目指せるかどうか、といった厳しい現状を再認識させるご講演でした。

最後に司会の松村先生から、「生産速度が速く、食糧生産と競合しないとされる海洋・水生バイオマスですが、実用化に当たってのボトルネックや事業化のポイントは？」という点を中心に、パネルディスカッションが行われ、ここでも様々な問題点や厳しい現状を含めた将来展望が各講演者から語られました。海洋・水生バイオマスを原料とした高付加価値品を製造するための要素技術開発はかなり進んでいるものの、安価な燃料を製造するための要素技術の開発はなお途上であり、事業化の展望もこの現状を反映して高付加価値化のところでのみ語られることが多いが、2030年ごろをメドとして燃料利用の方も技術的なメドを付けたいという意見や、そもそも原油価格が高止まりにならない限りペイしないという現状認識、あるいは、公的支援やインセンティブ(CO₂税など)の整備がなければ、日本国内では海洋・水生バイオマスを対象としたシステム操業は条件的に(炭素源の供給、日射量の不足、建設・設備コスト、人件費 etc の面で)厳しいが、条件上有利な海外展開では可能性が開けるかもしれないといった見通しについても語られました。

講演会終了後、17:00より再び会場を3階に移し、意見交換会(懇親会を含む)が行われ、講演者と参加者の間でさらに細部にわたる議論や情報交換を行いました。大学で「木質バイオマスと何か? なぜ今、重要視されているのか(されるべきか)?」といったことを講義等で教えている筆者の立場から言えば、「成長速度の面では優位性があるものの、木質バイオマスに比べて地球上での賦存量の点では少なく、まだまだ利用は非常に限られている」という程度でしか認識しておらず、体系的な理解は(ましてや紹介はなおのこと)できていなかった「水生・海洋バイオマス」の利用・開発研究の現状について、問題点も含め概観でき、学部学生に対してもフィードバックするための非常に貴重な機会になったと考えています。

次回(第18回)の合同交流会について、世話人は日本エネルギー学会バイオマス部会の担当となっていますが、今回の世話人の松村先生がその部会長を兼任しているため、次回も再度世話人を務めるという次第になっています。ただ、今回は実働部隊となるスタッフが少なく、ほとんど松村先生が孤軍奮闘状態だったのに対し、今回は大所帯を背景に多くのスタッフが参画され、規模も大きくなるものと期待しています。ちなみに、気が早いですが、我が日本木材学会バイオマス変換研究会は次々回(2019年第19回)の合同交流会の世話人担当が既に決まっています。木材学会の会員の皆さまにも奮ってご参加いただける講演会企画にできれば幸いです。

※注1:「合同交流会」を主催するバイオマス関連学協会の部会・研究会(6団体)は下記の通り

- ・化学工学会エネルギー部会バイオマス分科会
- ・日本エネルギー学会バイオマス部会
- ・バイオマス利用研究会
- ・木質バイオマス利用研究会
- ・日本木材学会バイオマス変換研究会
- ・バイオインダストリー協会アルコール・バイオマス研究会

※注2:日本木材学会北海道支部・創立50周年記念事業(講演会・祝賀会)に関する報告は本誌ウッドイェンス No.44_2017年9月30日発行(学会ホームページ上のURLはhttp://www.jwrs.org/woodience/mm044/5_044.pdf)に掲載していますので、合わせてご覧いただければと思います。



写真 講演会会場の様子