

光合成藻類によるバイオ燃料生産

Biofuel production of photosynthetic algae

渡邊 信*

1. はじめに

理想的なバイオエネルギー生物として、(1) 化学組成とバイオ燃料生産分子の高い割合、(2) 高い成長率/バイオマス生産、(3) 高い収穫指数/短いローテーション期間、(4) 耕作限界地で成長する能力、耕作可能な土地に対して農作物と競合しない、(5) 高い淡水利用効率および低生産コスト、(6) 低収穫コスト、(7) 価値の高い副産物の生産があげられている⁽¹⁾。藻類は、光学顕微鏡下でその存在と形態が確認できる微細藻類と肉眼的に確認できる大型藻類に分類されるが、これらの基準のほとんどに対処する可能性があるため、注目を集めている。

2. 微細藻類

2.1 高オイル生産性藻類の開発

自然界からの回収、あるいは突然変異や遺伝子組み換えにより、高オイル生産性等有用な藻類培養株の数は増加している。このような藻類を開発するための重要な生物学的研究として、有用藻類培養株の表現形質、遺伝形質に関する研究や、遺伝子工学的研究が活発に行われている。特に、アセチルコエンザイム A を脂肪酸合成経路に移行させる重要な酵素であるアセチルコエンザイム A カルボキシラーゼのような脂肪酸合成酵素を増幅させる技術⁽²⁾のような直接的な代謝改変に加えて、光合成系内の個々の酵素動態、分子輸送、産物分泌、細胞壁構造、および調節機能の操作を標的とした代謝工学的研究がなされている⁽³⁾⁽⁴⁾。一方でポリカルチャー（多種培養）がモノカルチャー（単一種培養）よりも生産性が高く、かく乱からの回復力が高いという陸上植物を中心に実証されてきた成果⁽⁵⁾をもとに、多様な藻類によるポリカルチャー（多種培養）を対象とする技術開発がなされている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

2.2 大量培養

微細藻類培養において、一貫して高い生産性を確実にするためには培養パラメータを最適化し、検証する必要がある。栄養塩や CO₂ の代替技術や攪拌、ストレス供与、ナノ粒子の適用等の培養最適化技術は、藻類燃料の産業化に避けては通れない技術開発課題である（表 1）。特に下水利用は藻類燃料生産コスト低減やエネルギー収支改善に不可欠な要素であるが、その効率的利用には解決すべき課題が多い。

藻類培養システムとしては、開放系培養と閉鎖系培養の 2 つに区分され、開放系培養としてはレースウェイ型培養が、閉鎖系培養としてはフラットプレート型フォトバイオリアクターや管状型フォトバイオリアクターがよくつかわれている。それぞれに利点・欠点はあるが、バイオマス生産性に焦点を当てた場合には、開放系のレースウェイポンドよりも閉鎖系のほうが高いバイオマス生産性を示すと言われている。実際にそれぞれについて、これまで報告されてきた最高値を比較してみると、レースウェイポンド培養では、最大の生産性がオーストラリアのパスで *Dunaliella salina* を培養した時に年平均で 20-37g/m²/day⁽⁸⁾、フラットプレートでは、*Chlorella* で 3.2g/L/day⁽⁹⁾、管状型では、*Phaedactylum tricornutum* が 1.9g/L/day⁽¹⁰⁾ と報告されている。場所や藻類種の違いがあるため、*Spirulina* に限定し、類似の気候帯で比較すると、レースウェイ培養で 5g/m²/day⁽¹¹⁾（イタリア）、11.8g/m²/day⁽¹²⁾（メキシコ）、25g/m²/day⁽¹³⁾（オーストラリア）、フラットプレートで 6g/m²/day⁽¹¹⁾（イタリア）、チューブ型で 8g/m²/day⁽¹⁴⁾（米国西部）と報告されており、*Spirulina* においては、閉鎖系培養のほうが高生産性とは言えない。また、培養シ

* 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/生命環境系

表1 代替栄養源と培養最適化技術

代替資源あるいは技術	炭素・エネルギー源	利点	問題点
排水	農業排水・産業排水・都市排水	培養液(肥料)依存性の低減あるいは解除; 安価; 必要な栄養素を含有; 水資源の仕様を低減	コンタミネーションや培養の不安定さのリスク向上; 有毒な化学物質を含む可能性有; 有色排水では光合成増殖を妨害する可能性有
排ガス	高濃度CO ₂ を含む産業排ガス(ボイラー、発電所、セメント製造、アルコール製造工場等)	安価な形態の濃縮CO ₂ ; 微細藻類の成長を促進; 生産にともなう環境影響の改善	排ガス排出直後の高温が微細藻類に悪影響を及ぼす可能性有、および有毒化学物質(NO _x 、SO _x 等)を含有; 排ガス影響評価のための研究が必要
攪拌・混合	藻類培養時にシステム内での均質性を保つための攪拌	物質・熱伝達の促進、培養藻類細胞の均一な増殖を促進; 藻類細胞の沈降とバイオフィームの形成・蓄積を防ぐ	エネルギー消費: 高い攪拌速度で細胞にせん断ストレスを引き起こす可能性有; 最適な攪拌速度を理解するためのさらなる研究が必要
ストレス	オイル含量を高める等代謝反応変化を誘導する条件設定	産生される脂質の量; ストレスによりコスト削減効果が期待	微細藻類株により異なる; 必須増殖因子に影響を及ぼす場合に増殖効率を低下
ナノ粒子適用	ナノスケール量子影響の物理化学的特性(表面電荷、組成、磁性など)を活用	光束と波長制御が可能; 抗菌効果は培養時のコンタミネーションを低減	リサイクル利用に費用対効果はまだない; 安定性、環境効果等の研究が必要

システムの性能を評価する際には、培養に係る課題だけでなく、培養～最終産物生産までのシステム全体への影響を分析することが重要である。例えば、レースウェイポンド培養が低コストと低エネルギー消費型であるように見えるが、バイオディーゼル、メタノール、グリセロール、バイオチャー、電気、熱の生産を目的とした多目的モデル研究では、フラットプレート型フォトバイオリアクターが最大の経済的パフォーマンスを示し、さらに性能を最大化し、環境影響も最小化すると評価されている⁽¹⁵⁾。

地域特性に応じた高い藻類生産性をもつ開放系での大量培養技術の成功例としては、福島県南相馬地域の過酷な気象・環境条件で、様々な土着藻類を混合したポリカルチャー技術があげられる⁽⁷⁾。これまでは温暖で、日照時間が長いところが藻類燃料生産に適しているとされ、世界の30%弱を占める冷温帯域での試みは困難とされていた。南相馬市では、土着藻類集団に通常の窒素、リン等の栄養塩のほかにリサイクル利用可能な酢酸を添加することで、最高値で年平均29.2g/m²/dayという高い生産性が、周年を通じて安定的得られている⁽⁷⁾。この技術は日本だけでなく、中国、欧州、ロシア、カナダ等多くの地域で適用できる可能性を広げたことで注目されている。

2.3 収穫・抽出技術

培養されている藻類が収穫されるときに濃度は、0.03 - 0.1%程度であることから、オイル抽出のためには200倍以上の濃縮が必要となる。濃縮・脱水には主に遠心分離、浮上濃縮、ろ過、凝集沈殿が利

用されている。遠心分離は濃縮効果が高いが、高エネルギー消費と高コストである⁽¹⁶⁾。浮上濃縮は高い浮上性をもつ藻類では効果的であるが、通常の藻類ではマイクロバブルで表面に浮上させることから、装置が高額であり、もし効果を高めるために凝集剤を使用する場合には遠心分離よりも高コストになる⁽¹⁷⁾。ろ過法は高い濃縮効果をもち、遠心分離法より低エネルギー消費であるが、目詰まりを解消する定常的な管理が必要である⁽¹⁶⁾。凝集沈殿法は低エネルギー消費で低コストであるが、抽出工程に影響を及ぼさない凝集剤の開発を行う必要がある⁽¹⁸⁾。以上のように問題点を解決するために更なる研究開発が必要とされる。最近、磁性ナノ粒子凝集剤が、それが示す高い濃縮効率のため注目されている。静電的に陽性の磁性ナノ粒子が、負に帯電した微細藻類細胞と相互作用して高い凝集効果をもたらし、磁気的に分離・濃縮される。磁性ナノ粒子凝集剤を使った場合には、費用の問題や、下流のオイル抽出・精製プロセスへの影響をおよぼさないような費用効果の高いリサイクルプロセスを開発する必要がある⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。藻類は極性脂質と中性脂質を含むが、このうち中性脂質が燃料原料として使われる。いくつかの脂質抽出法が検討されているが、究極的に一つの方法で決定できるものはなく、藻類の脂質含量に応じて効果的である方法が、細胞破碎法との組み合わせも含めて採用されている。表2に主に使われている8つの方法を概要、要求される事項と主要な特徴・問題点とともに示した。

表2 各種抽出法

抽出法(文献)	概要	要求される事項	抽出効率・速度; 主要な特徴・問題点
有機溶媒抽出	液・液抽出において、細胞から非極性TAG脂質を抽出	溶剤の再利用のための蒸留にエネルギーが集約;(最も効率的な溶媒は、クロロホルム:メタノールおよびヘキサン)	適度な効率・スロー; 有機溶媒は潜在的に火災・健康・環境リスク有
溶媒抽出加速	高温・高圧での溶媒抽出	加圧された非反応性ガス(窒素等); 高温、高エネルギー	高効率で従来の溶媒抽出よりも速い; 溶媒や高温/高圧による安全性リスク有
超臨界CO2	超臨界状態にCO2が溶媒として作用	脱水; 高圧ガスを必要とするため高エネルギー	高効率で高速; 粗抽出脂質には有機溶媒がない。高い物質移動、広範囲での調整可能性有。LCA評価が必要
压榨プレス	機械的に細胞を粉砕して油を絞り出して抽出	脱水; 後で色素を除去のための溶媒抽出; 高エネルギー	低効率; 産物への熱損傷の可能性; 細胞壁・細胞膜が堅固な藻類には不適
超音波補助抽出	超音波パルスによる高圧および低圧の波で、細胞にせん断力を引き起こす	別の抽出方法と組み合わせて使用; 特に前処理がない場合には歩留まりが向上	低効率; エネルギー集約的、アップスケール困難、マイクロ波を用いた抽出の場合ほど温度が高くない
マイクロ波補助抽出	加熱により細胞内に水蒸気ポケットを形成し、膜透過性を誘導	同上	高効率で超音波処理よりも速い; 高温により熱感熱性成分に損傷を与える可能性有
イオン抽出	有機溶媒ではなく塩溶液で抽出	非常に特異的な溶解特性を有するように調整された合成塩	適度な効率; 有機溶媒でないため、安全性は高いが、効率増進の研究が必要
浸透圧抽出	高張/低張性状態により細胞膜を損傷	処理後に、脂質を水から抽出	低効率; 大量の廃水を生成する

2.4 運輸燃料への変換

抽出された中性脂質は通常エステル交換により脂肪酸メチルエステル (FAME) に変換され、バイオディーゼルとして運輸燃料に利用される。しかし、FAME は内燃機関の腐食、NO_x の発生、低温での凝固の問題があるため、水素添加処理と異性化により、軽油、ジェット燃料、あるいはガソリン代替として直接利用できる燃料形態に変換されるようになってきている。これは運輸業界からの藻類・植物オイル由来運輸燃料生産に共通した要請でもあることから、すでに Chevron/ARA (Applied Research Associates) 社や Neste 社等いくつかの企業がプラントを建設し、商業化している。

一方で、水熱液化技術 (HTL: Hydrothermal Liquefaction) が注目されてきている。HTL は、高温高圧 (250℃ ~ 370℃, 40 気圧 ~ 200 気圧) での亜臨界水反応により、有機物が油化される現象を利用し、藻類細胞をまるのまま高温高圧下で数十分反応させることで、バイオクルードを得る技術である⁽²⁰⁾。この技術を藻類に適用したパイオニア研究が 1994 年に日本人研究者によってなされ⁽²⁰⁾、様々な藻類で HTL によるエネルギー消費率が検討された結果、純エネルギー生産になることが報告された⁽²¹⁾。14 年後に HTL に関する総合的なレビューがなされたことで⁽²²⁾、再び HTL への世界的関心が高まってきている。特定の高脂質含量の藻類からの溶媒等による脂質抽出・燃料変換という従来のプロセス技術を全藻類細胞の HTL 技術におきかえることで、燃料生産コストを 85% 以上も大きく減らすことができ、

遺伝子組み換えによる高増殖藻類との組み合わせ等により、バイオ燃料生産コストを 150 円 / L まで減らすことができると試算されている⁽²³⁾。藻類 HTL 技術についてはいくつかの解決すべき重要な課題はあるが、詳細については、2015 年 ~ 2017 年にかけて、藻類の HTL 技術のレビューが発表されているので、参考にされたい⁽²⁴⁾。

2.5 持続性モデル

エネルギー収支、コスト収支を算定するモデルは更新され、高度化しつつあるが、両者とも、技術開発途上における算定であるため、現在では不確実性が高い。生産コストについては、アルゴリズムの焦点の定め方で異なっているが、500 円 / L ~ 125 円 / L になるとされている。特に下水利用により完全な下水処理が達成できれば、下水処理からの収益を勘定にあれば藻類燃料の生産コストは 20 円 / L となるとされている⁽²⁵⁾。

環境の観点から解析する LCA では、健康影響、生態系影響、および資源枯渇の観点から、1) 発がん作用物質、2) 有機物質の呼吸への影響、3) 無機物質の呼吸への栄養、4) 気候変動、5) 電離放射線、6) オゾン層破壊、7) 生態毒性、8) 酸性化、9) 土地利用、10) 化石燃料の枯渇、11) 鉱物資源の枯渇の 11 の要素が重要な評価項目となっている。それぞれの項目での環境影響を定量化する方式があり、そのツールが提供されている⁽²⁶⁾。残念ながら、日本における藻類燃料研究ではこの種の LCA 解析がほとんどなされていない。

CO₂ 収支においてはいくつか報告されているが、

それぞれの研究でCO₂排出に関する計算に均一性がなく、CO₂排出はマイナス～>500gCO₂/MJと大幅な違いがある⁽²⁷⁾。エネルギー収支においても不確定性は高く、藻類燃料生産過程での獲得エネルギーと消費エネルギー比（EPR）は、0.35～4.34と油脂植物の1.44～5と比較して低いEPRを示している⁽²⁸⁾。

3. 大型海藻類

大型藻類の大半は海域に生育している。海藻類は食料や化学製品として利用されており、食品産業で市場規模は5600億円/年と算定されている⁽²⁹⁾。海藻燃料としては、メタン、水素、エタノール、バイオディーゼル、ブタノールが検討され、それぞれについて欠点/隘路があきらかになってきている（表3）。現時点ではメタンが産業化の可能性が最も高いとされていることから、ここでは海藻からのメタン生産に特化して説明する。

3.1 海藻からのメタン発酵

海藻からのメタン発酵プロセスは、基本的には他の生物を基質とした場合と同じである。メタンガス生成には、水理学的滞留時間（HRT：hydraulic retention time）と有機負荷率（OLR：Organic loading rate）が重要な因子となっているが、海藻は分解が遅い有機成分をもつため⁽³⁰⁾、長いHRTと低いOLRが必要であると考えられる。

3.2 技術的隘路

3.2.1 海藻の選定

海藻の化学組成が季節的に変動することにより、バイオメタン生成に大きな影響を及ぼすが、炭水化

物、タンパク質や脂質のような揮発性固形分（VS：Volatile Solids）が多ければ多いほど、バイオメタン生成ポテンシャルが高いと考えられる⁽³¹⁾。VSが湿重量（ww）の10-19%、CN比が17-26を示す*Sacharina latissimi*, *Laminaria digitata*, *Fucus spiralis*, *Ascophyllum nodosum*等褐藻類が30m³CH₄/t・ww（湿重量）を超える高いメタン生成を示す⁽³¹⁾。以上のように海藻成分の特徴をその季節的変動を踏まえて理解すること、さらにVSやCN比の高い種類を選定することが重要である。

3.2.2 前処理技術

塩分集積は灰分量を多くする原因となることから、成分のロスを最小化するように塩分を除去することが必要とされる。これまで、前処理として、機械的（切断、チョッピング、細胞解離（maceration）およびミリングによるサイズ縮小）、生物学的（酵素による加水分解）、化学的（酸またはアルカリによる加水分解）、熱処理（加熱および蒸気破碎）および化学熱的方法による加水分解等がなされている。これまで機械的処理が未処理と比較してメタン生成が23%～177%増加したと報告されている⁽³¹⁾。

3.2.3 発酵戦略—単発酵（mono-digestion）と共発酵（co-digestion）

緑藻の海藻であるアオサ（*Ulva*）で、アオサだけでの単発酵によるメタン生成と海藻を乳製品スラリー（25%海藻：VS基準で75%スラリー）と共発酵すると、単発酵よりも有意に良好な結果が得られている⁽³²⁾。このほかにも、グリセロール、牛スラリー、小麦わら、家畜ふん尿、廃ミルク、廃フライ油などの様々な基質と海藻の共発酵についての優位

表3 海藻からのバイオ燃料

バイオ燃料	技術	利点	問題点
メタン	嫌気発酵	嫌気発酵には海藻の乾燥が不要のため低エネルギー消費型。天然ガスや水素とブレンド可。	海藻種の季節変動に関して完全に理解されていない。基質の栽培コストが高い。海藻の塩濃度がガス生成に影響するため、適切な前処理が必要。長期発酵は海藻の灰分含有率のため疑問がある。海藻栽培のためのライセンス供与は未だに審査中であり、今後国の海藻バイオガス産業に関する政府の方針と法律の制定に注意を払う必要がある。これは他の燃料にも共通。
水素	嫌気的暗所発酵と光発酵	水素の高エネルギー密度。燃焼時の炭素排出はない。メタン（ハイトンと呼ばれる）ブレンドし、ハイメタン生成が可。	収率は低く、プロセスはエネルギー集約的。H ₂ は高圧縮（700バール）を必要とし、輸送燃料として低圧縮（メタンなどの220バール）では使用不可。高圧縮時の圧縮および安全性確保で13%のエネルギー消費。
エタノール	アルコール発酵	ガソリンとのブレンド可	海藻の糖成分がエタノールに発酵可能であるため、収率は低い。この工程は乾燥工程が必要であるためエネルギー集約的。
バイオディーゼル	乾燥試料からオイル抽出	軽油とブレンド可	海藻のオイル含量は2-11%と低い。研究室レベルでのテスト段階
ブタノール	アセトン・ブタノール・エタノール発酵	エタノールよりも優れた燃料特性を持つ。に高度な燃料で、ガソリンとブレンド可。インフラはガソリンからブタノールへの切り替えが容易簡単に切り替えることが可能	まだ未成熟の技術。発酵に関与する微生物のブタノールの毒性により、非常に低い収率。

性が報告されている。特に褐藻類 *Saccorhiza katissima* と *S. polyshides*, は牛スラリーと共発酵させると、それぞれ 335LCH₄/kgVS (揮発性物質) および 255LCH₄/kgVS の高いメタン生産が得られる⁽³³⁾。また、海藻 (褐藻と緑藻) と廃ミルクの共発酵が、非常によいメタン生成を示した⁽³⁴⁾。以上の知見は、適切な海藻とパートナーを選定することが重要であることを示しているといえる。

3.3 生産コスト

大型海藻は微細藻類とちがって、収穫・濃縮プロセスは比較的容易ではあるが、海藻バイオマス生産コストは 45 円/kg 乾燥重量とアイルランドでは算定されている⁽³⁵⁾。この値は草本類バイオマス生産コストが約 11 円/kg なので⁽³⁶⁾、かなり割高である。草本類からのメタン生産コストが 174 円/m³ なので、海藻バイオマスからのメタン生産コストはその 4 倍程度になると試算される。いかに生産コストを下げるのかが大きな問題となるが、高いバイオメタン生成能力をもつ海藻類の開発と経済効果の高い培養方法・運搬方法を検討する必要がある。さらに、海藻がバイオメタン生成に適した成分を持つ時期の決定と収穫、前処理条件の最適化、共発酵プロセスの最適化が必要とされる。

文献

- 1) R.J. Henry, Evaluation of plant biomass resources available for replacement of fossil oil, *Plant Biotechnol. J.*, **8** (3), 288 ~ 293 (2010).
- 2) A. Ghosh, S. Khanra, M. Mondal, G. Halder, O.N. Tiwari, S. Saini, T.K. Bhowmick and K. Gayen, Progress toward isolation of strains and genetically engineered strains of microalgae for production of biofuel and other value added chemicals: a review, *Energ. Convers. Manage.*, **113**, 104 ~ 118 (2016).
- 3) R.E. Jinkerson, V. Subramanian and M.C. Posewitz, Improving biofuel production in phototrophic microorganisms with systems biology, *Biofuels*, **2**, 125-144 (2011).
- 4) J. Lu, C. Sheahan and P. Fu, Metabolic engineering of algae for fourth generation biofuels production, *Energ. Environ. Sci.* **4**, 2451-2466 (2011).
- 5) D. Tilman, D. Wedin and J. Knops, Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems, *Nature*, **379**, 718-720 (1996).
- 6) M. Stockenreiter, F. Haupt, J. Seppälä, T. Tamminen and K. Spilling, Nutrient uptake and lipid yield in diverse microalgal communities grown in wastewater, *Algal Res.*, **15**, 77-82 (2016).
- 7) M. Demura, M. Yoshida, A. Yokoyama, J. Ito, H. Kobayashi, S. Kayano, Y. Tamagawa, M. Watanobe, N. Date, M. Osaka, M. Kawarada, T. Watanabe, I. Inouye, and M.M. Watanabe, Biomass productivity of native algal communities in Minamisoma city, Fukushima Prefecture, Japan, *Algal Res.*, **29**, 22-35 (2018).
- 8) N.R. Moheimanii and M.A. Borowitzka, The long-term culture of the coccolithophore *Pleurochrysis carterae* (Haptophyta) in outdoor raceway ponds, *J. Appl. Phycol.*, **18**, 703-712 (2006).
- 9) J. Doucha, F. Straka, and K. Li´vansky´, Utilization of flue gas for cultivation of microalgae (*Chlorella* sp.) in an outdoor open thin-layer photobioreactor, *J. Appl. Phycol.*, **17**, 403-412 (2005).
- 10) E. Molina Grima, E.H. Belarbi, F.G. Acién Fernández, A. Robles Medina and Y. Chisti, Tubular photobioreactor design for algal cultures, *J. Biotechnol.*, **92**, 113-131 (2001).
- 11) M.R. Tredici and R. Materassi, From open ponds to vertical alveolar panels: the Italian experience in the development of reactors for the mass cultivation of phototrophic microorganisms, *J. Appl. Phycol.*, **4**, 221-231 (1992).
- 12) E. Olguín, S. Galicia, G. Mercado and T. Pérez, Annual productivity of *Spirulina* (*Arthrospira*) and nutrient removal in a pig wastewater recycling process under tropical conditions, *J. Appl. Phycol.*, **15**, 249-257 (2003).
- 13) M.A. Borowitzka, Commercial production of microalgae: Ponds, tanks, tubes and fermenters, *J. Biotechnology*, **70**, 313-321 (1999).
- 14) A. Richmond and C.W. Zhang, Optimization of a flat plate glass reactor for mass production of *Nannochloropsis* sp outdoors, *J. Biotechnol.*, **85**, 59-269 (2001).

- 15) T.M. Mata, A.A. Martins and N.A. Caetano, Microalgae for biodiesel production and other applications: a review, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, **14**, 217-232 (2010).
- 16) J. Kim, G. Yoo, H. Lee, J. Lim, K. Kim, C.W. Kim, M.S. Park and J.W. Yang, Methods of downstream processing for the production of biodiesel from microalgae, *Biotechnol Adv.*, **31**, 862-876 (2013).
- 17) A.I. Barros, A.L. Gonçalves, M. Simões and J.C. Pires, Harvesting techniques applied to microalgae: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **41**, 1489-1500 (2015).
- 18) D. Vandamme, I. Foubert and K. Muylaert, Flocculation as a lowcost method for harvesting microalgae for bulk biomass production, *Trends Biotechnol.*, **31**, 233-239 (2013).
- 19) K.K. Sharma, H.H. Schuhmann and P.M. Schenk, High lipid induction in microalgae for biodiesel production. *Energies*, **5**, 1532-1553 (2012).
- 20) Y. Dote, S. Sawayama, S. Inoue, T. Minowa, S. Yokoyama, Recovery of liquid fuel from hydrocarbon-rich microalgae by thermochemical liquefaction, *Fuel*, **73**, 1855-1877 (1994).
- 21) S. Sawayama, T. Minowa and S. Yokoyama, Possibility of renewable energy production and CO₂ mitigation by thermochemical liquefaction of microalgae, *Biomass Bioenergy*, **17**, 33-39 (1999).
- 22) A.A. Peterson, F. Vogel, R.P. Lachance, M. Fröling, M.J. Antal, Jr and J.W. Tester, Thermochemical biofuel production in hydrothermal media: a review of sub- and supercritical water technologies, *Energy Environ. Sci.*, **1**, 32-65 (2008).
- 23) P. Blowers, R. Davis, C. Meghan, E. Dunlop, E. Frank, R. Handler, D. Newby, P. Pienkos, J.W. Richardson, W. Seider, D. Shonnard and R. Skaggs, Sustainability, In NAABB (National Alliance For Advanced Biofuels and Bio-products) Full Final Report Section II, 167-197 (2014).
- 24) A.P.K. Gollakota, N. Kishore and S. Gu, A review on hydrothermal liquefaction of biomass, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, **81**, 1378-1392 (2017).
- 25) T.J. Lundquist, I.C. Woertz, N.W.T. Quinn and J.R. Benemann, A realistic technology and engineering assessment of algae biofuel production. Energy Biosciences Institute, University of California, Berkeley (2010).
- 26) C.G. Gutierrez-Arriaga, M. Serna-Gonzalez, J.M. Ponce-Ortega and M.M. El-Halwagi, Sustainable integration of algal biodiesel production with steam electric power plants for greenhouse gas mitigation, *ACS Sustain. Chem. Eng.*, **2**, 1388-1403 (2014).
- 27) J.C. Quinn and R. Davis, The potentials and challenges of algae based biofuels: a review of the techno-economic, life cycle, and resource assessment modeling, *Bioresource Technol.*, **184**, 444-452 (2015).
- 28) M.K. Lam and K.T. Lee, Microalgae biofuels: a critical review of issues, problems and the way forward, *Biotechnol. Adv.*, **30**, 673-690 (2012).
- 29) G. Roesijadi, S.B. Jones, L.J. Snowden-Swan and Y. Zhu, Macroalgae as a Biomass Feedstock: a Preliminary Analysis, USA. U.S. Department of Energy (2010).
- 30) J.M. Adams, A.B. Ross, K. Anastasakis, E.M. Hodgson, J.A. Gallagher, J.M. Jones and I.S. Donnison, Seasonal variation in the chemical composition of the bioenergy feedstock *Laminaria digitata* for thermochemical conversion, *Bioresource Technol.*, **102**, 226-234 (2011).
- 31) E. Allen, D.M. Wall, C. Herrmann, A. Xia and J.D. Murphy, What is the gross energy yield of third generation gaseous biofuel sourced from seaweed?, *Energy*, **81**, 352-360 (2015).
- 32) E. Allen, D.M. Wall, C. Herrmann and J.D. Murphy, Investigation of the optimal percentage of green seaweed that may be co-digested with dairy slurry to produce gaseous biofuel, *Bioresource Technol.*, **170**, 436-444 (2014).
- 33) C.H. Vanegas and J. Bartlett, Green energy from marine algae: biogas production and composition from the anaerobic digestion of Irish seaweed species, *Environ. Technol.*, **34**, 2277-2283 (2013).
- 34) T. Matsui and Y. Koike, Methane fermentation

of a mixture of seaweed and milk at a pilot-scale plant, *J. Biosci. Bioeng.*, **110**, 558-563 (2010).

- 35) M.R. Tabassum, A. Xia and J.D. Murphy, Potential of seaweed as a feedstock for renewable gaseous fuel production in Ireland, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, **68**, 136-146 (2017).
- 36) B.M. Smyth, H. Smyth and J.D. Murphy, Can grass biomethane be an economically viable biofuel for the farmer and the consumer?, *Biofuels. Bioprod. Bioref.*, **4**, 519-537 (2010).

著者略歴



渡邊 信

1948 年生

筑波大学藻類バイオマス・エネルギーシステム開発センター／生命環境系
北海道大学大学院博士課程修了

1978～2006：国立環境研究所

2006年～現在：筑波大学

専門分野：藻類バイオマス科学