

海藻バイオマスを利用した水素生産のフィージビリティ

谷生 重晴
バイオ水素株式会社

1. 緒言

2009年9月23日、国連気候変動首脳会合における鳩山由起夫総理大臣による1990年比25%二酸化炭素削減宣言以来、二酸化炭素を排出しない再生可能エネルギーの普及拡大が強い後押しを受け、11月には再生可能エネルギー全量買い取りに関するプロジェクトが資源エネルギー庁主幹で立ち上げられた。再生可能エネルギーには、太陽、風力、バイオマス、地熱、水力、海洋資源から生成されるエネルギーで、再生可能起源の水素が含まれる(IEAの定義)。筆者はバイオマスを使用して水素製造を試みているが、水素エネルギー社会の早期実現を願う者にとっては非常にうれしい宣言であった。

水素製造にバイオマスを使用することには、バイオマス以外の再生可能エネルギーで水素製造することに比べて優れたところがある。それは、他のエネルギーからの水素製造は、例外もあるが、発電による生産だから、二酸化炭素を排出しないだけであるが、バイオマスは大気中の二酸化炭素を集めて太陽エネルギーを蓄積したので、エネルギー利用するとき二酸化炭素を分離回収し、CCS(Carbon Dioxide Capture and Storage)技術などで貯留すれば、大気中の二酸化炭素濃度を減少することもできるからである。このように太陽発電、風力発電などにはできない遙かに優れた利点を持っている。

近年、建築廃材や廃糖蜜、農業廃棄物などを使用した発酵法によるエタノール生産や、廃食油を使用したバイオディーゼルの生産が盛んに試みられている。このような廃棄バイオマスを利用することは価値創出の観点からは非常に望ましいことではあるが、エネルギー創出量としては、既に利用されている割合が大きいので、あまり多くを期待できない。また、休耕田を再開したり国土を切り開いてバイオマスを増産することも量的には多くを得難い。

しかし、日本は四面を海に囲まれているから、海洋バイオマスを栽培してエネルギー生産することが考えられる。ブラジルは広大な大地を利用してサトウキビを栽培しバイオエタノール生産で脚光を浴びている。サトウキビの全量をエネルギーとして利用できれば、日本の石油消費量の50%にもなるサトウキビ生産量であるが、その栽培面積は8万km²(2008年)[1]でしかない。

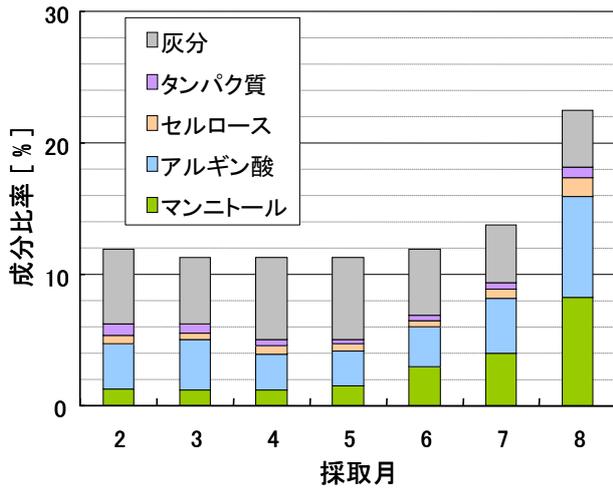
このことを考えれば、日本は領海だけでも国土面積より大きい43万km²を持ち、専管水域(排他的経済水域)に至っては約405万km²と国土の10倍以上の面積を持つので[2]、海洋バイオマスを栽培すればエネルギー自給さえも夢ではなくなる。

ここでは、この広大な海域を利用した海藻栽培による発酵水素生産が、どのような海藻を栽培してどのような問題を解決すれば経済性を持つか検討し、今後の見通しを述べる。

2. 海藻の生産性と栽培方法

2.1 海藻の生産性

北海道区水産研究所の三本菅のコンブ栽培研究によれば[3]、羅臼町沖合でのオニコンブの生産性は8月にもっとも収穫量が多く14.5kg-wet/m²にもなり、その後は減量する。海藻成分は図1に示すように成長とともに変化し、8月にはマンニトール8%、その他13%と水素発酵に適したマンニトールがもっとも多くなる。コンブは含水率が約80%と高いが収穫量が多いので、栽培すれば1haあたり約30ton-dryのバイオマス、11.6tonのマンニトールが穫れることになる。これはサトウキビのバイオマス収量20ton-dry/ha(沖縄)~30ton-dry/ha(ブラジル)、スクロース収量で約9ton/ha~14ton/haとほぼ同量である。すなわち海のサトウキビである。このように海藻は優れたバイオマス資源であるが、多くのコンブの生育温度は20℃以下なので、生息海域は限られる。南北に長い日本は、海流の影響で冷海域から暖海域まであり、各種海藻の生育に適した海域を図2のように区分して表現している[4]。この地理的分布に従えば、北海道から本州の北部までがこれまでコンブの生息域と考えられた。



Arranged from data "Yoshiaki SANBONSUGA, Bull.Hokkaido Reg. Fish. Res. Lab., 49, 1-76(1984)"

図1 オニコンブの月別成分含有割合

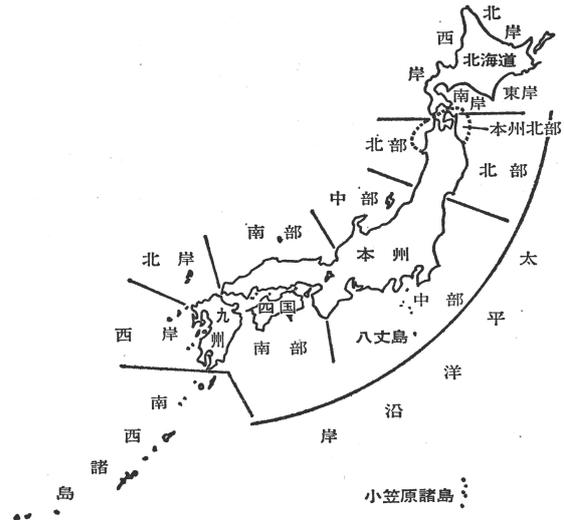
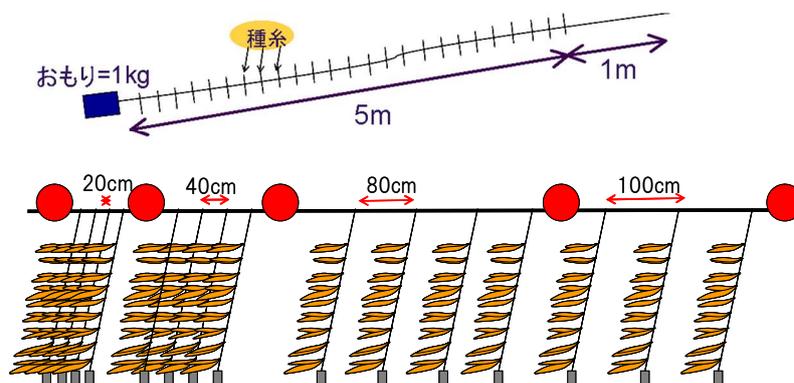


図2 海藻生育の地理的分布区域

日本の沿岸各区域では、それぞれの温度環境に適した非常に多種類の海藻が生育しているので、エネルギーバイオマスとして栽培するに相応しい海藻の選択が模索されている。東京海洋大学の能登谷らは、島根県隠岐郡海士町で各種海藻の養成網栽培を行い、生産性を現在調べているが、昨年7月に開催された日本応用藻類学会大会で、非常に驚嘆する栽培成果を発表した[5]。それによると、図3に示すような長さ6mのおもりの付いた垂下ロープに、おもりから20cm間隔で5mのところまでマコンブの種苗糸を結び、幹綱に垂下ロープを20、40、80、100cm間隔でそれぞれ10本ずつ結んで、垂下密度と収穫量の関係を調べたところ、5ヶ月の栽培で、表に示したように、垂下ロープ1本あたり30~60kgのバイオマスを収穫できた。このデータから1haあたりの収穫量を推定すると、470~1500トンのバイオマスを得られることになる。海士町は海水温が北海道に比べて高いのでコンブは自生しなかったが、今回の発表で、栽培するなら、短い成長期間で、従来知られていた収穫量の3~10倍量のバイオマスが南部海域で収穫できることが初めて明らかになった。



①垂下ロープ1本あたりの収穫量(kg)

垂下ロープ間隔(cm)		20	40	80	100
5/20~6/13	A	30.6	33.4	45.1	47.5
	B	28.7	39.3	51.0	60.0

②1haでの推定生産量(t/ha)(幹ロープを1m間隔で、100本張った時)

垂下ロープ間隔(cm)		20	40	80	100
5/20~6/13	A	1,532	836	564	475
	B	1,435	982	637	600

図3 島根県海士町におけるマコンブの栽培密度と収穫量の相関測定

2.2 海藻の栽培方法

海苔は江戸時代から、ワカメは戦後、どちらも日本で開発が進んだ代表的な栽培海藻である。一年生のこれら海藻はヒビと呼ばれる網やロープに種胞子を自然または人工的に付着させ[6]、多年生のアカモクなどは種苗を結束バンドなどでロープに結びつけて栽培する[7]。海苔は網を使う方法が一般的で、育苗法が異なる二種類の網を張り替えて、秋から3月までに8回から10回くらい摘み取ることが出来る[6]。摘み取りには、高速摘菜船が海中より持ち上げた網の下に潜るようにして摘菜する[6]。一方、ワカメやコンブなどでは図4に見られるように、主ロープに2m~5mの培養ロープをつり下げ、反当収量を多くする技術も開発されている[7]。アンカーの効率的利用を図るため、主ロープの張り方などに工夫を凝らし、さらに収量を上げる方法なども考えられている。

ジャイアントケルプは海水温が15℃以下であれば、年3回の収穫が可能である[3]。マコンブは春から夏にかけて成長するが、ワカメは冬から春にかけて繁茂する。このように成長時期の海水温が海藻によって異なったり重なったりする。海水温に応じて栽培種を変えていくなれば、このような栽培によって年に多数回の収穫が可能になるであろう。収穫回数が年2回以上になれば、より狭い栽培面積で必要量の海藻バイオマスを生産できるだけでなく、アンカー敷設など栽培施設の利用効率も高くなり、安価な水素生産に寄与することになる。

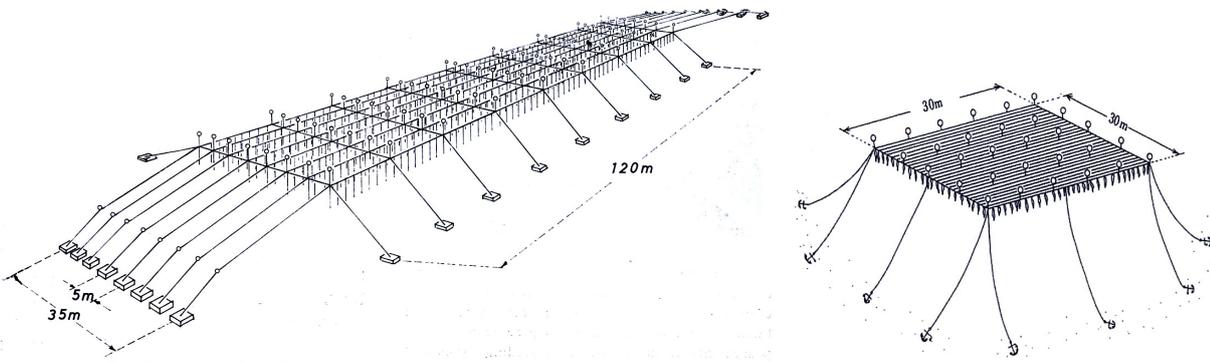


図4 培養ロープによる高収穫栽培法の例

3. 水素生産の経済性

毎日100トンのコンブを原料にして発酵水素生産したときの経済性を、現在得ている諸データを元に、現状と改良後とで計算してみよう。生産した水素は近未来ではFCVの燃料として100円/m³以上の価格すなわち60円/kWh以上のエネルギー価値になると思われるが、燃料電池で使用し、1m³の水素を消費して1.7kWhの出力が得られるとする(エネルギー変換効率48%相当)。また、発酵に必要な動力を10kWh/(ton・d)と仮定し、発電でこれをまかなった残りの電力は、30円/kWhで売電可能とする。この価格は太陽電池発電の現状買電価格48円/kWhより安い。発酵装置の年間稼働日数は300日で、発酵温度を40℃に保つために必要な熱は、燃料電池からの温水と海藻を絞った残渣を燃焼して得ることとする。

表1は、マンニトールから、筆者が持つバクテリアの水素収率(2.5mol-H₂/mol-man.)と、今後新規バクテリアを探索して得られると仮定した収率(3.5mol-H₂/mol-man.)で水素を生産したときの計算結果、さらに海藻のマンニトール含有率も品種改良で向上したと仮定した計算結果である。現状でも100トンのコンブから一般家庭400軒程度の電力をまかなう発電量が得られるが、発酵に必要な電力を差し引いたあとの売電収入は、買電価格が安いので3,820万円程度である。一方、100ton/dの処理能力を持つ発酵装置が1億5,000万円弱で建設でき、毎年の保守費が建設費の3%とすれば、年間430万円の保守費と人件費600万円、3,000万円の海藻購入費によって、総額4,050万円の経費がかかる。トン1,500円の炭素クレジットを活用すれば、208万円の収入が計上できるので、表1に示すように、差し引き1.2万円の赤字に収まり、損益分岐点が1日100トン程度の処理量にあることが分かる。

我々は、収率は低いがアルギン酸を資化できる水素発生バクテリアを発見しているので、新規バクテリアの探索で、より高収率のバクテリアを発見できればより多量の水素が生産でき、さらに、コンブの品種改良を行えば、経済性が高くなる。また、発酵廃液は肥料効果が高いので、牧草地など散布時期に制限が無い所や海藻栽培海域に散布できれば、肥料として販売、利用することが考えられる。そのほかにも、大規模になれば二酸化炭素排出権取引による収入も考えられる。

このように海藻栽培による水素生産はいくつかの改良によって採算の可能性を持ち、日本のエネルギー自給のためにも、海洋バイオマスの栽培による水素生産は期待される技術開発である。

表 1. 1日100トンのコンブを処理してマンニトールから発酵で水素を生産した時の発電量と売電収入

コンブの場合	現状の収率	収率改善	収率・収量改善	
海藻処理量	100	100	100	ton-algae/d
マンニトール含率	8	8	14	%-mannitol
アルギン酸含率	7	7	7	%-alginate
水素収率(Mannitol)	2.5	3.5	3.5	mol/mol
水素収率(Alginate)	0.7	1.0	1.0	mol/mol
燃料電池出力	1.7	1.7	1.7	kWh/m3-H2
自家消費動力	10	10	10	kWh/ton-algae
水素価格	51	51	51	¥/m3-H2
売電価格	30	30	30	¥/kWh
操業日数	300	300	300	day
水素生産量	925,552	1,301,119	2,076,503	m3/yr
発電量	1,573,439	2,211,902	3,530,056	kWh/yr
消費動力	1,000	1,000	1,000	kWh/d
売電可能量	1,273,439	1,911,902	3,230,056	kWh/yr
売電収入	38,203	57,357	96,902	k¥/yr
保守費(3%)	4,300	4,300	4,300	k¥/yr
プラント人件費	6,000	6,000	6,000	k¥/yr
海藻単価	1,000	1,500	1,500	¥/ton
海藻購入費	30,000	45,000	45,000	k¥/yr
総支出	40,300	55,300	55,300	k¥/yr
CO2削減量	1,390	1,954	3,118	ton-CO2/yr
クレジット収入	2,085	2,931	4,677	k¥/yr
年間売上利益	-12	4,988	46,279	k¥/yr

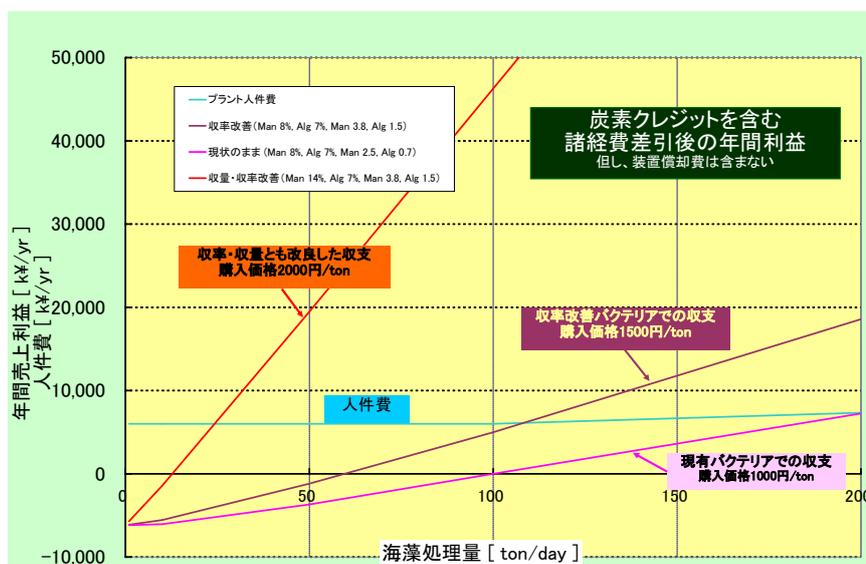


図 5 海藻処理規模と年間売上利益の関係

4. 終わりに

上述から、海藻には陸上エネルギーバイオマスの代表であるサトウキビよりバイオマス生産性、糖質生産性の遙かに高いものがあり、日本の沿岸海域を利用して栽培すれば、採算性を持つエネルギー生産が可能であることが分かった。また、島嶼自治体が離島で海藻を栽培し地産地消するなら、エネルギー価格は内地より割高だから、経済性を持たせることはかなり容易であるといえる。

今後の開発方向を明確にするために問題をまとめてみると、

1. 海藻の成長と基質成分変化のデータ取得
2. 海藻の栽培期間と収穫時期
3. 海藻の生育海域
4. 海藻の効率的栽培、収穫方法の開発
5. 安価な栽培設備敷設方法の開発
6. マンニトールから高収率、高速で水素発生するバクテリアの探索
7. アルギン酸分解水素発生バクテリアの探索
8. 発酵廃液の利用法の開発

などが挙げられる。

参考文献

- 1) 日経 BP 社ホームページ ; <http://eco.nikkeibp.co.jp/article/report/20091221/102921/>
- 2) 海上保安庁ホームページ ; http://www1.kaiho.mlit.go.jp/JODC/ryokai/ryokai_setsuzoku.html
- 3) Sanbonsuga, Y.; “Studies of the growth of forced Laminaria” , Bull. Hokkaido. Reg. Fish. Res. Lab., **49**, 10-13 (1984).
- 4) 千原光雄 ; 標準原色図鑑全集、第 15 巻、保育社、1970
- 5) 依田欣文、山河文広、大西祥平、大久保一嘉、能登谷正浩 ; 隠岐海士町沿岸におけるマコンブ 2 種苗の生長と生長量におよぼす密度の影響、日本応用藻類学会大会、2011 年 7 月
- 6) 全国海苔貝類漁業協同組合連合会ホームページ ; <http://www.zennori.or.jp/chisiki1.html>
- 7) 能登谷正浩氏提供資料
- 8) 谷生重晴、菅沼剛 ; 海藻を基質に利用した発酵法による水素生産の可能性について、水素エネルギーシステム、vol.24, pp.19-24, 1999