

# 海藻バイオマス栽培による発酵水素生産

谷生重晴<sup>1)</sup>、能登谷正浩<sup>2)</sup>

1) 横浜国立大学 教育人間科学部

2) 東京海洋大学 海洋科学部

## Fermentative Hydrogen Production by using Cultivated Seaweeds

Shigeharu TANISHO<sup>1)</sup>, Masahiro NOTOYA<sup>2)</sup>

1) Faculty of Education and Human Sciences

Yokohama National University

2) Faculty of Marine Science

Tokyo University of Marine Science and Technology

Economical analysis on fermentative hydrogen production from cultivated seaweeds was studied. Productivities of seaweeds were approximately 145 ton/ha at *Laminaria japonica* ARESCH, 150 ton/ha at *Sargassum horneri*, 105 ton/ha at *L. japonica*, etc. by 4months cultivation. From 1 ton-wet of *L. japonica* ARESCH, ca. 80 kg of mannitol and 16 Nm<sup>3</sup>-H<sub>2</sub> were expected to obtain. By selling 48 ¥/kWh, which is the legislated price for solar sell power, the income from surplus power was 1,214 ¥/ton after necessary use for fermentation. If it is possible to produce hydrogen by the theoretically maximum yield from mannitol, the income increases to 3,945 ¥/ton. This means that the production of hydrogen from seaweed by fermentation will be payable by reducing the production cost of seaweeds below 1,500 ¥/ton. It was proposed to find new bacteria which have higher property on hydrogen yield than a bacterium found at Tanisho's lab which is able to produce hydrogen at a small yield from alginate to make economics sure.

**Keyword:** hydrogen production, fermentation, seaweed, kelp, *Laminaria japonica*, *Enterobacter aerogenes*

### 1. はじめに

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首相の宣言である。

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に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km<sup>2</sup> (2008年) [1]でしかない。

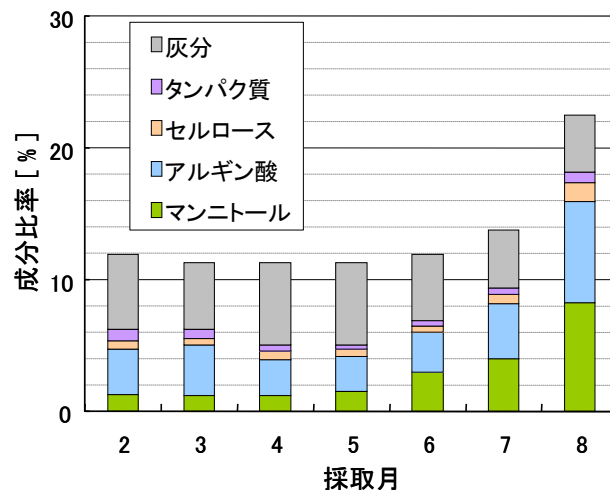
このことを考えれば、日本は領海だけでも国土面積より大きい43万km<sup>2</sup>を持ち、専管水域(排他的経済水域)に至っては約405万km<sup>2</sup>と国土の10倍以上の面積を持つので[2]、海洋バイオマスを栽培すればエネルギー自給さえも夢ではなくなる。

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/m<sup>2</sup>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、



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

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)から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°C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コンブの生息域である。

日本の沿岸各区域では、それぞれの温度環境に適し

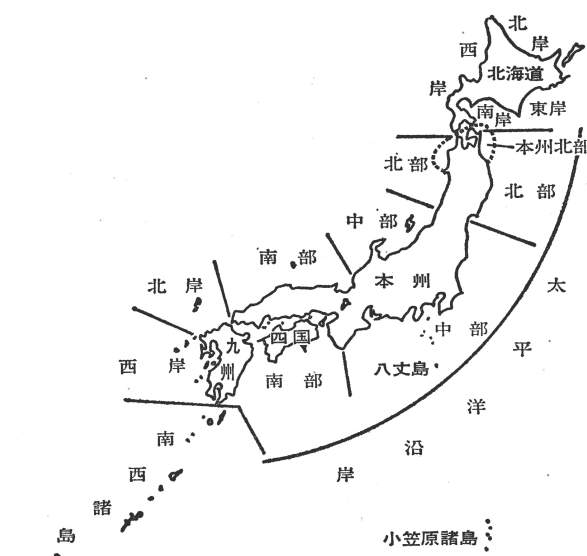


図2 海藻生育の地理的分布区域

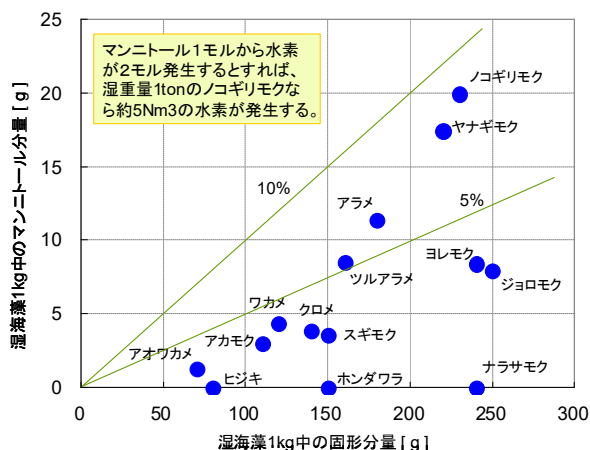


図3 海士町で11月に採取した各種海藻の湿重量1kgあたりの固形分量とマンニトール含有量

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[5]。それによると、表1に示すように、海藻のなかにはわずか4ヶ月間の栽培で、100m養成網当たり1トン以上にバイオマスが成長するものもいることが分かった。ツルアラメは本養殖時期が遅れたために生産量が少なかったようで、正確な収穫量は不明である。海士町では海水温が北海道に比べて高いので、コンブの成長に適した海水温域での成長期間は短

いが、それでもマコンブは6月初めには1トンまで成長している。同じ培養期間で1.5トンまで成長したアカモクにマンニトールがどれくらい含まれているかは不明であるが、11月に採取した各種海藻について、固形分重量とマンニトール含有量を筆者の研究室で調べた結果がある(図3, 未発表)。どの海藻も8月のオニココンブ(固形分21%、マンニトール8%)に比べるとマンニトールはかなり少ないが、2月のオニココンブは1.3%の含有率だから、それと同等の含有率を11月に持ち、固形分比率がオニココンブと遜色のないノギリモク、ツルアラメ、ワカメなどは、今後の研究によっては有望なエネルギーバイオマスになるかもしれない。

また、コンブの収穫期に7%を占めるアルギン酸は、グルコースによく似た分子構造を持つ炭水化物で、収穫期を問わず高い含有率を占める。現在、アルギン酸から水素を発生する細菌は探索中であるが、今後アルギン酸分解水素発生細菌が発見されれば、

表1 島根県海士町における2月から4ヶ月の栽培で収穫した海藻の100m養成網あたり収穫量

海藻の名前	収穫量
	kg/100m
ツルアラメ	340
ヒロメ	741
マコンブ	1,054
アカモク	1,500

海藻バイオマスの水素収量は大きく増加する可能性がある。

## 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、図4のように、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5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°C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



図4 高速摘菜船の海苔収穫作業[6]

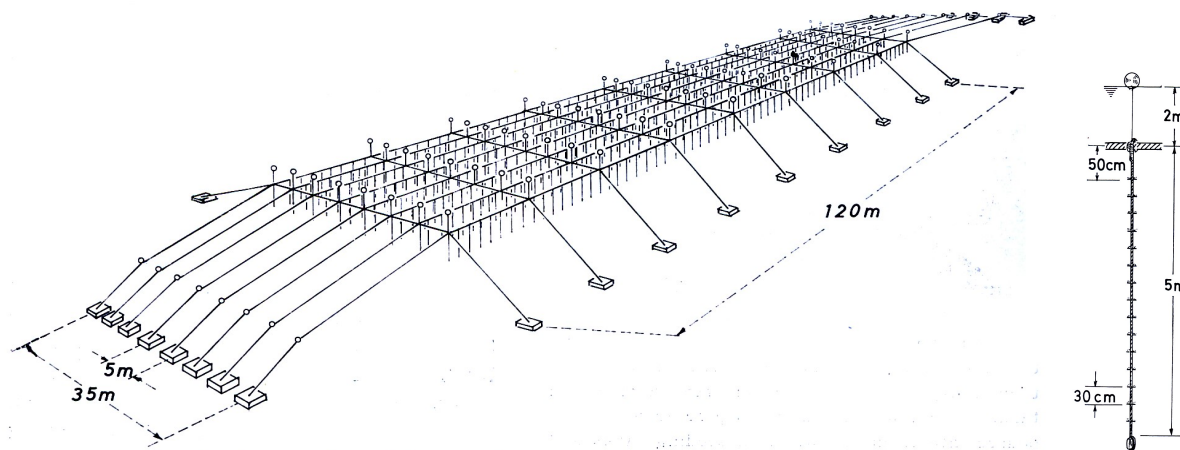


図5 大型海藻養殖施設と培養ロープ

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、サトウキビ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。

### 3. 発酵による水素発生の原理

生物は生存や増殖に必要なエネルギー（ATP: adenosine tri-phosphate）をバイオマスの主成分であるグルコースの分解や太陽光によって得ている。酸素が利用できるときはグルコースを水と二酸化炭素に分解して、利用できないときは発酵の代謝産物を生産してエネルギーを得る。水素は発酵の過程で副次的に発生する。発酵でマンニトールからグルコースを経て水素を発生する生化学反応を酢酸代謝経路で表すと図5のようになる。この反応経路はもっとも高収率で水素を発生する経路で、1モルのグルコースから酢酸のみを代謝生産するなら4モルの水素を生産できる。酪酸のみ、乳酸のみを代謝生産するならそれぞれ2モルと0モルの水素生産になるが、1モルのマンニトールからならそれぞれ5モル、3モル、1モルと1モル余分に生産できる。

### 総括反応式

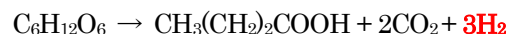
グルコースから酢酸：



マンニトールから酢酸：



マンニトールから酪酸：



マンニトールから乳酸：

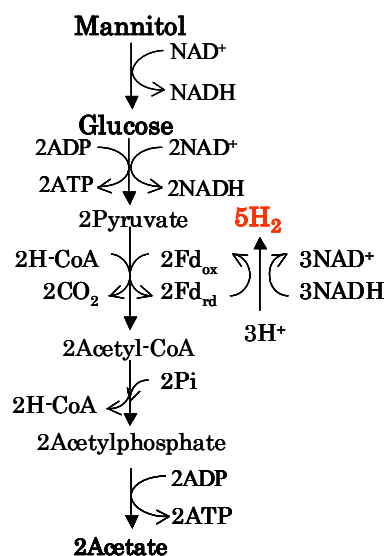


図6 マンニトールー酢酸代謝の水素発生経路

コースより優れたバイオマス資源であるが、現在、マンニトールから活発に水素を生産する細菌は *Enterobacter aerogenes* が報告[8]されているだけであ

る。また、バクテリアは多種類の代謝産物を生産しながら増殖するので、その水素収率は 1.6 mol-H<sub>2</sub>/mol-mannitol しかない[8]。谷生研究室では収率 2.0 で水素発生するバクテリアを発見したようであるが、今後、早急に理想値に近い収率で水素発生する新しいバクテリアを発見する必要がある。

#### 4. 水素生産の経済性

毎日 1 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、現状と理論最大値で計算してみよう。生産した水素は近未来では FCV の燃料として 100 円/m<sup>3</sup> 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、1 m<sup>3</sup> の水素を消費して 1.7 kWh の出力が得られるとする（エネルギー変換効率 40%相当）。また、発酵に必要な動力を 1.5 kWh/(ton d) と仮定し、発電でこれをまかなった残りの電力は、太陽電池発電の現状買電価格 48 円/kWh で売電可能とする。発酵装置の年間稼働日数は 200 日で、発酵温度を 40°C 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 2 はマンニトールから *E. aerogenes* が現状の水素収率と理論最大収率で水素を生産したときの計算結果である。現状でも 1 トンの昆布から一般家庭 3 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わずか 1,214 円である。大型化して 10 トン処理しても 12,140 円である。一方、10 ton/d の処理能力を持つ発酵装置が 5,000 万円で建設でき、残存簿価 5% で 10 年償却するとすれば、1 日あたりの償却費は 23,750 円になる。1kW の燃料電池が 200 万円として、その 1 日あたり償却費 1,000 円を合算すると、合計 24,750 円となるから、それ以上の売電収入がなければ経済性が無いことになる。原料代を考慮すればさらに高い収入が必要である。しかし、収率 5 で水素生産できれば、39,450 円の売電収入になるから、海藻が 1,500 円/ton 以下で栽培可能なら黒字になる。すなわち、年 2 回の栽培で 3ton/(100m y) 収穫できるとして 45,000 円以下で 100m ロープ 1 本が敷設できることが栽培コストの条件になる。

我々は、収率は低い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さらに多量の水素が生産でき、経済性が高くなる。また、発酵廃液は、図 7 に示したように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つが、日本のエネルギー自給を目指すにはどれくらいの栽培面積が必要かコンブとサトウキビで試算、比較してみよう。

計算に当たって次の仮定をする。コンブは年 2 回栽培可能で、水素収率はマンニトール、蔗糖いずれも理論最大値とする。水素は燃料電池自動車で使用し、水素 1Nm<sup>3</sup> はガソリン 1L に相当する。また、日本の年間ガソリン消費量を 6,000 万 kL とする。表 3 にその結果を示す。サトウキビ栽培に比べ半分の栽培面積で、日本のガソリン消費量相当の水素を生産できることが分かる。1カ所当たり 40km (海岸沿い) x 10km (沖) で海岸から一望できる広さの栽培施設を、沿岸に 100カ所建設すれば足りる広さであるから、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 2. 1日1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

		現状	理論
コンブ	[ton/d]	1	1
マンニトール	[%-man]	8	8
含マンニトール	[mol-man./d]	440	440
燃料電池出力	[kWh/m <sup>3</sup> -H <sub>2</sub> ]	1.7	1.7
発酵消費電力	[kWh/ton d]	1.5	1.5
年間処理日数	[d/y]	200	200
売電価格	[¥/kWh]	48	48
水素収率	[mol/mol]	1.6	5
水素生産量	[mol-H <sub>2</sub> /d]	703	2,198
水素生産量	[m <sup>3</sup> /d]	16	49
発電量	[kWh/d]	27	84
売電収入	[¥/d]	1,214	3,945

表 3. 日本のガソリン消費量相当の水素を生産するために必要なコブとサトウキビの栽培面積比較

	コブ	サトウキビ	単位
バイオマス収量	290	100	[ton/ha]
バイオマス収量	29,000	10,000	[ton/km <sup>2</sup> ]
糖含率	8	15	[%]
糖収量	2,320	1,500	[ton/km <sup>2</sup> ]
水素収率	5	4	[mol/mol]
水素生産量	1,427,692	746,667	[m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> ]
ガソリン当量	1	1	[m <sup>3</sup> /L]
ガソリン消費量	6,000	6,000	[万 kL]
必要栽培面積	42,026	80,357	[km <sup>2</sup> ]



図 7. 発酵廃液の肥料効果

## 5. 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、糖質生産性の高いものがあり、日本の沿岸海域を利用して栽培すれば、自動車燃料の全自給を目指すことも不可能では無いことが分かった。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はないかと考えられる。

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](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、保育者、1970
- [5] 能登谷正浩、林裕一 ; 海士町の海藻養殖と展望、2009 海士町産業文化祭シンポジウム、2009 年 11 月 21 日
- [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、p.19-24 (1999)