

栽培海藻バイオマスを使用した発酵法による 水素生産の可能性について

谷生重晴

横浜国立大学教育人間科学部

E-mail: tanisho@ynu.ac.jp

Feasibility of Fermentative Hydrogen Production by Cultivated Seaweeds Biomass

Shigeharu Tanisho

Department of Environmental Sciences, Yokohama National University

Abstract

The feasibility of producing hydrogen from cultivated seaweeds was studied. By using the bacteria which we have now in our laboratory and the seaweed of the present yield, it is very difficult to obtain sales' benefits, but if we can find new bacteria which have hydrogen yield of 3.5mol from 1mol mannitol and 1.5mol from alginate, and can improve the mannitol productivity of seaweeds to 14%, the feasibility will have complete confidence.

Keywords: Hydrogen production, Fermentation, Seaweed, Biomass, Mannitol, Alginate

1. まえがき

地球温暖化防止には、化石燃料に代わり得る再生可能エネルギーの開発が急務である。有力な再生可能エネルギーに太陽エネルギー、風力エネルギー、バイオマスエネルギーがあり、太陽光発電や風力発電は、今や補助金を投入して普及を図る段階にまで達している。しかし、ひとりバイオマスエネルギーは、海外で大規模生産が行われているエタノール生産、メタン生産においても、我が国では未だ利用に経済性を見出す状況にない。それは、エタノール生産では食料と競合しないセルロースを利用目標にしているため糖化などにエネルギーを費やすことが、また、メタン生産ではメタンから効率よくエネルギー変換できないことが、原因の一つと言える。そこで、我々は、セルロースではなく、海藻バイオマスに多く含まれるマンニトールとアルギン酸に着目し、水素を生産することで、糖化エネルギーや蒸留エネルギー、改質エネルギーなどを必要としない効果的なバイオマスエネルギー利用を考えている。

2. 海藻バイオマスの生産性

サトウキビは陸生バイオマスの中で最も生産性の高い植物の一つであるが、サトウキビとコンブのヘクタール当たり生産性(収穫量)は、それぞれ約 100 トン(ブラジル)と 145 トンである。含水率がそれぞれ約 30%と 20%であるから、固形分重量で比較すれば、30 トンと 29 トンになりほぼ等しく、コンブは非常に生産性の高い海藻である。さらに、サトウキビは畑で 1 年間の栽培が必要であるのに、栽培コンブやワカメは、種苗から海面培養に移るまでは陸上の施設で過ごすので、海面で

表 1. 陸生、海生バイオマスの生産性比較^{1,2)}

植物名	測定地	固定系	純生産量 [t/ha/yr]
ネピアグラス	プエルトリコ	C4	85.9
サトウキビ	ハワイ	C4	67.3
ソルガム	カリフォルニア	C4	46.6
トウモロコシ	イタリア	C4	34.0
トウモロコシ	塩尻	C4	26.5
キャッサバ	ジャワ	C3	41.0
テンサイ	カリフォルニア	C3	42.4
テンサイ	札幌	C3	22.9
コンブ*	北海道羅臼	—	149

はずか6~7ヶ月と栽培期間は短い。また、表2に示すように、栽培期の重ならないワカメなど他の海藻との多毛作を行えば、単位面積当たりの年間バイオマス生産性では、海藻栽培の方が遙かに高くなる。日本は国土の十数倍の専管水域を持つから、経済性を持たせられれば、海藻バイオマスの栽培による水素エネルギー生産により我が国のエネルギー自給を図ることも夢ではない。

表2. コンプとワカメの栽培月

	本養殖開始月	収穫月	収穫量 t/ha
羅臼コンブ	3	8	149
三陸ワカメ	10~11	3	100
鳴門ワカメ	11	2~3	80

3. 海藻の主成分からの発酵水素発生量

図1はマコンブの成長と蓄積される成分の変化を示したものである²⁾。マコンブは、収穫期にはマンニトールとアルギン酸をそれぞれ湿重量の約8%と7%蓄え、固形分の71%を占める。これまで、*Enterobacter aerogenes*が主成分のマンニトールから水素発生するバクテリアとして知られており、その収率は1.6mol-H₂/mol-Manと、必ずしも大きくはない。そこで、最近、我々は海藻バイオマスを原料とした水素生産を目指すために、より水素収率の高いバクテリアの探索に力を注いだ。その結果、まだ属種は同定出来ていないが、収率2.5molで水素発生する新規バクテリアを発見した。また、海藻のもう一つの主成分であるアルギン酸から水素を発生するバクテリアの報告が見あたらないので、アルギン酸から水素発生するバクテリアの探索も同時に行った。その結果、0.7molの収率で水素を発生する別の新規バクテリアも発見した。

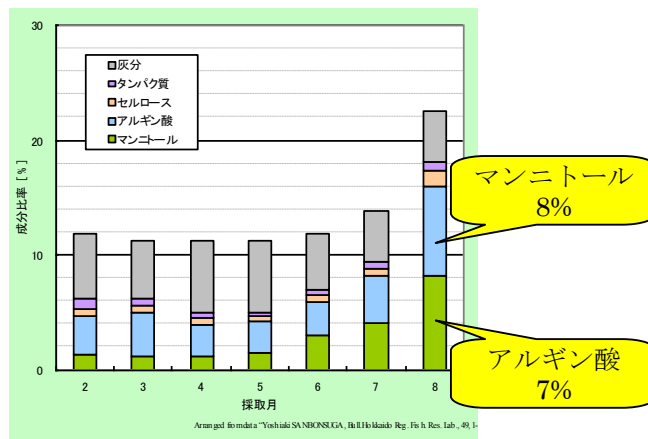


図1. マコンブの成長と成分変化²⁾

これらのバクテリアを使用すれば、1トンの湿コンブから31 Nm³の水素が生産できる。これは、電力としては52 kWh (燃料電池の発電効率を47%0.6kWh/m³-H₂とする)、ガソリンでは31 L相当のエネルギー量である。

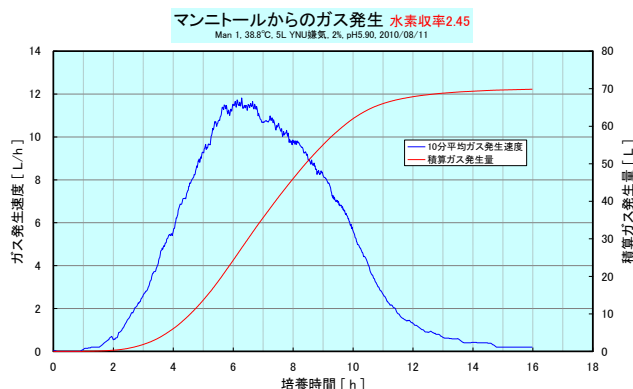


図2. 新規バクテリアのガス発生曲線

この能力でも、コンブやワカメの廃棄部分、アオサなど漂着海藻など原料が無料である海藻を使用すれば、売電価格が20円/kWhでも経済性を持たせられるが、栽培海藻による大規模エネルギー生産では原料コストを組み込まなければならないから、さらに高い収率を持つ新規バクテリアを探索する必要がある。

4. 栽培海藻による水素生産のコストと採算性

水素生産の採算性を計算するために、次の仮定を設ける。

- (1) 燃料電池出力： 0.6 m³-H₂/kWh (純水素燃料電池の変換効率を47%と仮定)
- (2) 燃料電池価格： 60kW出力が4M¥と仮定
- (3) 自家消費動力： 10 kWh/ton-algae (攪拌、ポンプなどの動力として)
- (4) 売電価格： 20 ¥/kWh (水素価格を33.3¥/m³と仮定)
- (5) プラント建設費： 10 ton/dayの処理プラントを基準に、0.6乗で建設費が上昇すると仮定
- (6) プラント償却： 10年間の均等償却とする

- (7) プラント稼働日数： 300 day
- (8) プラント人件費： 100t/d まで 6M¥、1,000t/d では 18M¥、100～1000t/d までは大きさに比例して増加すると仮定
- (9) 海藻の購入単価： 1,500 ¥/ton-wet algae
- (10) CO2 削減量： 発電効率 30%のディーゼル発電機を使用する島嶼町村を仮定
- (11) CO2 クレジット： 1,500 ¥/ton-CO2 と仮定
- (12) 海藻栽培網設置撤去： 140 k¥/km (ワカメ栽培のデータを使用)
- (13) 年間収穫量： 300 ton-wet/ha (3 毛作を仮定)
- (14) 海藻購入単価： 1,500 ¥/ton-wet (種付け、収穫の機械化により労働負担が減ると仮定)

このような仮定を設定して、発酵生産した水素による燃料電池での発電電力による年間売り上げ利益を計算した。表 3 は 10ton/d の処理能力を持つ発酵水素製造プラントの仮説建設費を示している。また、表 4 は全国で 2 番目に生産量の多い鳴門のワカメ栽培に関わる経費を参考に計算した海藻購入費と生産者の収入額である。表 5 は、1 日 100ton のコンブを処理するプラントで、コンブを原料に現在筆者らが所持している新規バクテリアを使用した時、将来、さらに新規のバクテリアが発見された時、コンブの品種改良で原料となるマンニトール含有率が向上した時にその新規バクテリアを使用して水素生産した時、のそれぞれの場合に年間利益がどのように変化するか計算した原表である。

現状では、バクテリアの水素収率が低く水素生産量が少ないので、原料購入費が極めて高く付き、水素生産は年間 4,400 万円の赤字になる。そこで、マンニトールとアルギン酸からそれぞれ 3.8mol、1.5mol の収率で水素発生する新規バクテリアを発見した時の売上利益を計算すると、額は低減するものの、やはり 2,500 万円ほどの赤字になる。しかし、コンブのマンニトール含有率を 14%に高める品種改良を行うなら、初めて売上利益は 350 万円の黒字になることを示している。この利益には炭素クレジットは含めていないが、クレジットの収入もかなり大きいものとなる事が分かる。図 3 は 1 日当たり処理量と収益の関係を示したもので、黒字化する規模が良く分かる。

5. 結論

以上の検討から、海藻栽培による発酵水素生産の可能性を明瞭に示すことが出来た。経済性を持たせるために開発しなければならぬ課題が明らかになり、今後の研究開発方向の決定に参考となる。またこれにより、日本のエネルギー自給が海藻バイオマスを栽培することで可能になることを示せたと考える。

参考文献

- 1) 村田吉男、植物の生産性、「バイオマス」生産と変換(上)、柴田/木谷編、学会出版センター(1981)、p.20
- 2) 農水省農林水産技術会議事務局編、バイオマス変換計画、1991年、光琳

表 3. 10t/d 処理プラントの建設費

建設費	10t/d	
発酵装置(10t/d)	40,000	k¥
脱硫、粗精製装置	2,000	k¥
燃料電池(60kW)	4,000	k¥
建設費	46,000	k¥

表 6. CO2 クレジット計算原表

重油エネルギー	10,000	kcal/kg
重油エネルギー	11.9	kWh/kg
比エネルギー	0.084	kg-pet./kWh
発電効率	30	%
石油消費量	0.28	kg-pet./kWh
炭酸ガス発生量	0.88	kg-CO2/kWh

表 4. 海藻栽培の経費と収入

海藻栽培の経費(鳴門漁協)と栽培者利益	
アンカー・ロープ	140 k¥/km
ロープ間隔	2 m
ロープ総延長	5,100 m
アンカー・ロープ	700 k¥/ha
償却費(10年)	70 k¥/ha・yr
海藻生産量(コンブ)	149 ton/ha
海藻生産量(ワカメ)	100 ton/ha
海藻生産量(その他)	50 ton/ha
必要栽培面積	100 ha/yr
海藻単価	1.5 k¥/ton
海藻売価	45,000 k¥/yr
海藻栽培純益	37,977 k¥/yr

表 5. 売上利益と CO2 クレジット収入計算

昆布の場合	現状の収率	収率改善	収量も改善	
海藻	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
燃料電池出力	0.6	0.6	0.6	m3-H2/kWh
自家消費動力	10	10	10	kWh/ton-algae
水素収率(Mannitol)	2.5	3.8	3.8	mol/mol
水素収率(Alginate)	0.7	1.5	1.5	mol/mol
売電価格	20	20	20	¥/kWh
操業日数	300	300	300	day
水素生産量	925,552	1,523,371	2,365,217	m3/yr
発電量	1,542,587	2,538,951	3,942,028	kWh/yr
消費動力	1,000	1,000	1,000	kWh/d
売電可能量	1,242,587	2,238,951	3,642,028	kWh/yr
売電収入	24,852	44,779	72,841	k¥/yr
償却費(10年)	18,313	18,313	18,313	k¥/yr
プラント人件費	6,000	6,000	6,000	k¥/yr
海藻単価	1,500	1,500	1,500	¥/ton
海藻購入費	45,000	45,000	45,000	k¥/yr
総支出	69,313	69,313	69,313	k¥/yr
年間売上利益	-44,461	-24,534	3,528	k¥/yr
CO2削減量	1,363	2,243	3,482	ton-CO2/yr
クレジット収入	2,044	3,364	5,223	k¥/yr

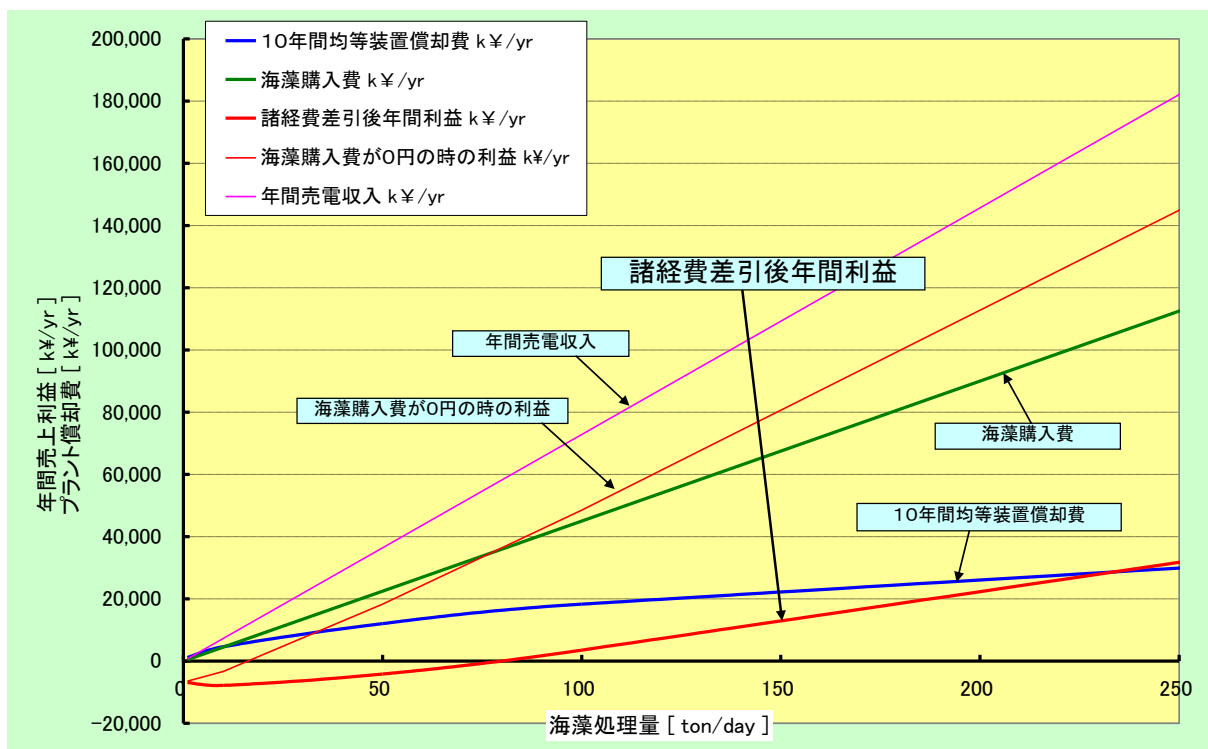


図 3. 1日当たり海藻処理規模と採算性との関係

廃棄ワカメを使用した時の利益計算 (但し、マンニトール、アルギン酸はコンブのデータ使用)

廃棄ワカメの場合	現状の収率	収率改善	収量も改善	
海藻	50	50	50	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	3.8	3.8	mol/mol
水素収率(Alginate)	0.7	1.5	1.5	mol/mol
燃料電池出力	0.6	0.6	0.6	m ³ -H ₂ /kWh
自家消費動力	10	10	10	kWh/ton-algae
売電価格	25	25	25	¥/kWh
水素価格	42	42	42	¥/m ³ -H ₂
操業日数	300	300	300	day
水素生産量	462,776	761,685	1,182,608	m ³ /yr
発電量	771,294	1,269,476	1,971,014	kWh/yr
消費動力	500	500	500	kWh/d
売電可能量	621,294	1,119,476	1,821,014	kWh/yr
売電収入	15,532	27,987	45,525	k¥/yr
償却費(10年)	12,082	12,082	12,082	k¥/yr
プラント人件費	3,000	3,000	3,000	k¥/yr
海藻単価	0	0	0	k¥/ton
海藻購入費	0	0	0	k¥/yr
総支出	15,082	15,082	15,082	k¥/yr
年間売上利益	450	12,905	30,443	k¥/yr
CO ₂ 削減量	681	1,121	1,741	ton-CO ₂ /yr
クレジット収入	1,022	1,682	2,612	k¥/yr

廃棄ワカメなら現状性能でも経済性が成り立つ。

