ブルーカーボン資材及び高タンパク質素材としての海苔の利用展開（第２報）

食品工業部
柘植圭介　吉村臣史
佐賀大学農学部
木村圭　吉田和広　川村嘉応

海藻や植物プランクトンなど，海の生物の作用で海中に取り込まれて貯留する炭素のことをブルーカーボンと称する.「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略（経済産業省）」に基づき，佐賀県の特産品であるノリのブルーカーボン資材としての可能性を追求することを目的として，高炭素吸収能を示すノリ品種の選抜を試みた．併せて，海藻の中でも格段に高いタンパク質含量であるノリの栄養学的特徴に着目し，高窒素吸収能を示す品種の選抜を試みるとともに，高タンパク質食品素材としてのノリの新たな活用を志向して，ノリを原料とした動物資源フリー食品（Plant Based Food ; PBF）の展開可能性についても検討を行った．その結果，保有株 18 種の中から，ブルーカーボン資材と PBF の両方に適するノリとして，CFMSⒶF2 及び U-51Ⓟを選抜した．この 2 株は，成長性，炭素含有率及び窒素含有率のいずれにおいても高値を示した．CFMSⒶF2 株は，共同研究機関において色落ち耐性変異株として作出された株であり，この株を核としたブルーカーボン向けノリ品種の作出が期待された.

１．はじめに

経済産業省が 2020 年 10 月に策定した「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略 [1]」では，産業政策とエネルギー政策の両面から成長が期待される 14 の重要分野について実行計画が策定されている．重要分野のうち「9 食料・農林水産業 [1]」では，大気中の温室効果ガスを回収・除去する「ネガティブエミッション」に向けた森林及び木材，海洋等の活用に関する目標が具体化され，海藻や光合成プランクトン等の海洋生態系による炭素貯留（ブルーカーボン）の大きなポテンシャルが期待されている.

同戦略には，ブルーカーボンに関する今後の取組として, 2023 年度までに海藻藻場による CO_2 の吸収・貯留量の計測方法を確立し，国連気候変動枠組条約等への反映を目指すとともに，産・官・学による藻場・干潟の造成・再生・保全の一層の取組を推進することが明記されている．さらに，海藻等の商業利用を進めるとともに，カーボンオフセット制度を利用した収益化を図り，CO_2 吸収を自律的に推進する計画である.

日本には古来より海藻類の食文化があり，海苔（スサビノリ ; 以下ノリと称する）をはじめ，コンブやワカメなど約 100 種類の海藻が食されているといわれている．海藻類の生産量は年間 33 万 6 千トン（生重量, 2021 年）に達し [2], なかでもノリの生産量が最も多く，年間約 22 万 9 千トンを占める.

有明海沿岸域は干満差が 6 m にも達する遠浅の干潟で, 潮間帯に自生するノリの養殖に適した地形である．そのため海苔の養殖が盛んに行われ，特に佐賀県は全

表１　ノリの都道府県別生産量

都道府県	生産量 (生重量; t)
宮城	12,782
千葉	3,173
神奈川	390
愛知	6,977
三重	5,400
大阪	71
兵庫	46,034
岡山	5,487
広島	1,926
山口	242
徳島	1,191
香川	6,432
愛媛	1,023
福岡	45,071
佐賀	56,938
長崎	221
熊本	35,767
大分	58
鹿児島	112
有明海合計	138,055
総計	229,294

令和3年海面漁業生産統計調査（農林水産省）より抜粋

国でもトップの生産量を誇る（表 1）.

本研究では，ブルーカーボンの資材としてのノリの有用性に着目し，その炭素吸収能を把握するとともに，高い炭素吸収能を示すノリ品種の選抜を試みた.

併せて，海藻の中でも格段に高いタンパク質含量であるノリの栄養学的特徴に着目し，窒素吸収能が高い品種の選抜を試みるとともに，高タンパク質食品素材としてのノリの新たな活用を志向して，ノリを原料とした動物資源フリー食品（Plant Based Food ; PBF）の展開可能性についても検討を行った．PBF の主要なタンパク質源としてノリのみを用いた場合，ノリを高配合しなければならず，結果的に原料コストの上昇やノリ独特の風味の発現を招いてしまう．そこで，植物性原料として佐賀特産の高オレイン酸大豆「HO1 号」も採り入れて，PBF のモデル食品を設計した.

ここで，HO1 号とは，佐賀大学が育種開発 [3]したオリーブオイル並みに高いオレイン酸含量（総脂肪酸の 80 %以上）の油脂を生産するダイズ品種である．リノール酸含量が従来品種の 10 分の 1 以下と極めて低いため，従来品種と比較して高い酸化安定性を示す．また，大豆特有の青臭みの原因物質である *n*-ヘキサナールがほとんど発生しないことも明らかになっている．HO1 号のこのような特性を活用することで，酸化安定性や風味に優れた PBF が調製できると考えられる.

２．実験方法

2.1 供試株の選定

佐賀大学で管理している 250 以上のノリ株を対象に，高成長性，色素変異性，色落ち耐性を指標として各株の大まかな特徴に基づき 24 株を選定した．さらに問題なく成熟し，かつ培養終期まで維持できた 18 株を選定し（表 2），培養試験に供した.

表 2　供試株

番号	株管理名	純系	備考
1	CFMSⒷF1Ⓟ	○	色落ち耐性株
2	G9HG		高成長
3	D-56-O	○	緑芽
4	S18正常1Ⓟ	○	佐賀大学基準株
5	野間3号Ⓟ	○	
6	U51Ⓟ	○	実験株
7	CFMSⒶ		色落ち耐性株、元株
8	CFMSⒷ		色落ち耐性株、元株
9	A-混Ⓟ		
10	S-18正常IIⓅ	○	佐賀大学基準株
11	オオバグリーン	○	
12	佐賀6号②Ⓟ	○	
13	CFMSⒶF2		色落ち耐性株、2代選抜
14	前の株 A-混	○	
15	橙Ⓟ	○	橙色芽
16	J-22R-1Ⓟ	○	赤色芽
17	佐賀1号Ⓟ	○	
18	G9Ⓟ	○	

2.2 培養試験

ノリ葉状体の特性を比較するためには，糸状体を培養して大きく育て，さらに成熟させることでタネ（殻胞子）を放出させ，その殻胞子から葉状体世代の培養に移るという手順が必要になる．そこで，糸状体で長期保存しているノリ 18 株を，①糸状体培養→②カキ殻糸状体培養→葉状体培養の順に培養した．各培養期の条件を以下に示した.

①糸状体培養 : 培地として人工海水 SF-1 に SWM-Ⅲ改変培地（表 3）を添加した強化海水を用い，白色 LED を 50 μmol photons m^{-2} s^{-1} で照射した．明暗周期は 12L / 12D の中日条件に設定し，18℃で培養した．培養容器として腰高シャーレを用い，培養期間は 1–2 ヶ月間とした.

②カキ殻糸状体培養 : 大きく育った糸状体を裁断し，カキ殻上に静置培養することで，糸状体をカキ殻に穿孔させ，カキ殻表面に海苔糸状体が十分繁茂するまで，

表 3　SWM-III 改変培地組成

A液	
$NaNO_3$	85 g
$NaHPO_4$ ・ $12H_20$	18 g
Na_2EDTA	5.58 g
$FeCl_3$ ・ $6H_20$	0.19 g
B液	
H_3BO_4	6.183 g
MnCl2 ・ $4H_20$	1.0885 g
$ZnCl_2$	54.5 mg
$CoCl_2$ ・ $6H_2O$	2.38 mg
$CuCl_2$ ・ $2H_2O$	17 μg
pH7.5	

海水 1 LにA液とB液を各2 mLずつ添加



図 1　カキ殻糸状体培養の様子

カキ殻が黒いノリ糸状体で覆われている

再度 1–2 ヶ月間 18℃で培養した（図 1）．十分に育った後は，カキ殻糸状体を培養容器ごと 26℃に調整し，1 ヶ月の高温処理を行った．その後，カキ殻糸状体を培養容器ごと 18℃に戻すことで，ノリ糸状体を成熟させ，胞子嚢の形成を促した．

③葉状体培養：18℃培養 1 週間程度で殻胞子放出が確認された株をカキ殻ごとマリンフラスコ内に移し，培養糸を入れて通気攪拌培養して，ノリの殻胞子を培養糸に付着させた（図 2）．顕微鏡下で培養糸に十分量の殻胞子が付着したことを確認した後，フラスコ内に培養糸を戻し，培養糸ごと殻胞子を培養した．殻胞子の培養開始日を 0 日目とし，全ての株を 45 日間培養することで各株の葉状体試料とした．この間，5 日に 1 回の培地の交換を行い，30 日目には酸処理をすべての株で実施した．酸処理条件は以下の通り；培養したノリ葉体を 0.5%クエン酸含有培地に 90 秒浸して処理し，その後 SF-1 人工海水で 2 回洗浄した．ノリの培養状況を表 4 に，培養終盤のノリ葉状体を図 2 に示した．

2.3 炭素/窒素含量分析

葉状体を 45 日間培養後，1 株あたり 20 枚の葉状体を不作為に取り出して葉長，葉幅を測定し，写真撮影を行った．その後，葉状体の水分をペーパータオルで吸水し，各葉をマイクロチューブに入れて，分析するまで - 80℃で保存した．炭素/窒素 (C/N) 測定試料においては，葉状体を凍結乾燥し，燃焼式窒素/炭素タンパク質分析装置（Sumigraph NC-Trinity，住化分析センター）にて C/N 含量を測定した．1 株あたりの反復数は 3 とした（n=3）．

2.4 PBF モデル食品の試作

PBF のコンセプトにご同意いただいた２社の佐賀県内の食品製造企業と協力し，各企業のアイデアを取り入れて海苔及び高オレイン酸大豆 HO1 号を高配合するモデル食品を試作した．

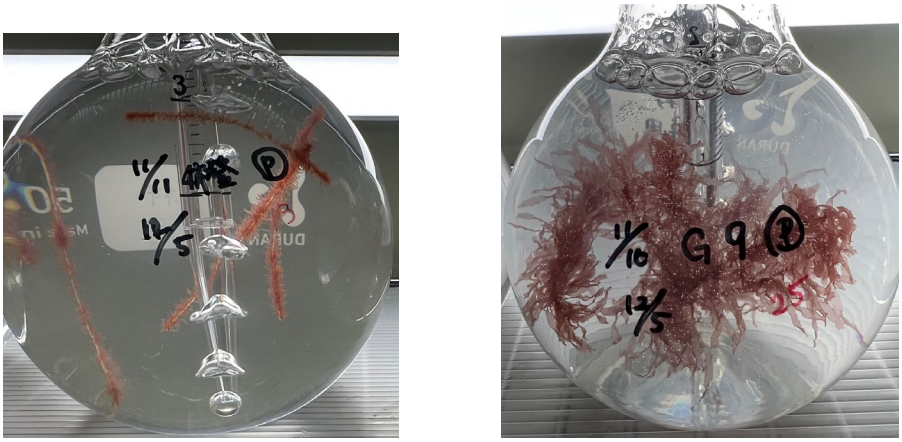


図２　葉状体培養の様子

左：培養初期，右；培養終期

表４　選定したノリ株の培養状況

	株名	糸状体培養 開始日	高温処理 開始日	成熟培養 開始日	葉状体培養 0日目	スケールアップ （500mL）	酸処理日	培養終了日
1	CFMSⒷF1Ⓟ	2022/3/15	2022/8/30	2022/10/4	2022/10/13	2022/10/26	2022/11/10	2022/11/27
2	G9 HG	2022/5/11	2022/8/30	2022/10/4	2022/10/12	2022/10/26	2022/11/10	2022/11/26
3	D-56-O	2022/5/11	2022/8/30	2022/10/4	2022/10/11	2022/10/26	2022/11/10	2022/11/25
4	S18正常 IⓅ	2022/6/15	2022/8/30	2022/10/4	2022/10/11	2022/10/26	2022/11/10	2022/11/25
5	野間3号Ⓟ	2022/5/11	2022/8/30	2022/10/4	2022/10/12	2022/10/26	2022/11/10	2022/11/26
6	U51Ⓟ	2022/6/15	2022/8/30	2022/10/4	2022/10/11	2022/10/26	2022/11/10	2022/11/25
7	CFMSⒶ	2022/1/19	2022/8/30	2022/10/19	2022/10/26	2022/11/10	2022/11/25	2022/12/10
8	CFMSⒷ	2022/3/15	2022/8/30	2022/10/19	2022/10/28	2022/11/10	2022/11/25	2022/12/12
9	A-混	2022/3/15	2022/8/30	2022/10/19	2022/10/26	2022/11/10	2022/11/25	2022/12/10
10	S-18正常 IIⓅ	2022/5/25	2022/8/30	2022/10/19	2022/10/26	2022/11/10	2022/11/25	2022/12/10
11	オオバグリーン	2022/6/16	2022/9/7	2022/10/19	2022/10/28	2022/11/10	2022/11/25	2022/12/12
12	佐賀6号②Ⓟ	2022/6/21	2022/9/7	2022/10/19	2022/10/26	2022/11/10	2022/11/25	2022/12/10
13	CFMSⒶF2	2022/3/15	2022/8/30	2022/11/3	2022/11/10	2022/11/25	2022/12/10	2022/12/25
14	前の株　A－混Ⓟ	2022/3/15	2022/8/30	2022/11/3	2022/11/12	2022/11/25	2022/12/10	2022/12/27
15	橙Ⓟ	2022/1/19	2022/8/30	2022/11/3	2022/11/11	2022/11/25	2022/12/10	2022/12/26
16	J-22R-1Ⓟ	2022/1/19	2022/8/30	2022/11/3	2022/11/11	2022/11/25	2022/12/10	2022/12/26
17	佐賀1号Ⓟ	2022/6/21	2022/9/7	2022/11/3	2022/11/10	2022/11/25	2022/12/10	2022/12/25
18	G9Ⓟ	2022/6/17	2022/9/7	2022/11/3	2022/11/10	2022/11/25	2022/12/10	2022/12/25

３．結果及び考察

3.1 培養試験結果（成長性）

培養終期まで維持できた 18 株について，表 4 のスケジュールで 1 サイクル 6 株ずつ培養することで，最終的に 18 株全ての葉状体試料を得た．各株について，ランダムに 20 枚の葉の葉長と葉幅を測定した結果，表 5 に示すように，株ごとに葉のサイズ特性が大きく異なっていた．平均葉長については，最小 17.57 mm から最大 161.66 mm と，約 10 倍の差が生じ，長い方から順に ”CFMSⒶF2”, ”U-51Ⓟ”, ”前の株 A-混Ⓟ” となった．平均葉幅についても，最小 1.51 mm から最大 17.55 mm と，約 10 倍以上の差が生じ，広い方から順に”前の株 A-混Ⓟ”，”佐賀 6 号②Ⓟ”，”G9HG”となった．葉長の大きい株と葉幅の広い株は必ずしも一致しなかった為，各株の平均長幅比 [葉長／葉幅] を算出した結果，最小 1.54 から 24.58 と，長く伸びやすい株と丸く広がりやすい株が存在することが明らかになった．長幅比は，大きい方から順に”橙Ⓟ”，”CFMSⒶF2”，”U-51Ⓟ”となった．

葉状体の高成長性は，炭素吸収性に優れるノリを選抜するうえで重要な特性である．ノリは細胞層が 1 層であり，葉の厚さは大差ないと考えられることから，葉面積が大きいことがこの特性を満たすことに繋がる．しかしながら，各株で葉の面積を正確に計測することは極めて難しいため，本研究では海苔の葉を楕円と仮定し，葉長と葉幅から楕円の面積を算出することで，便宜的な葉の面積とした．

概算葉面積の平均値は，最小 24.58 mm^2 から最大 1733.52 mm^2 と，大差が生じ，面積の大きい方から順に”前の株 A-混Ⓟ”，”CFMSⒶF2”，”U-51Ⓟ”となった．葉面積を指標にブルーカーボン資材として活用の見込まれるノリを選定すると，”前の株 A-混-P”，”CFMSⒶF2”，”U-51-P”となる．しかしながら，”前の株 A-混-P”に関しては，幅広い葉の特徴を有することから，養殖ノリと同様に網などに付着させて育てる場合には，隣の葉に干渉してしまうことが栽培上のデメリットとなることも予想される．このことから，”前の株 A-混-P”は，網などの基質に固定しないバイオリアクター等での生育に適しており，養殖同様に網を基質に用いる場合には，”CFMSⒶF2”及び”U-51Ⓟ”が適していると結論づけられた．

3.2 培養試験結果（炭素/窒素含有率）

続いて，選定した海苔株について C/N 測定を行った．平均窒素含有率については，最小 3.66 %から最大 6.85 %の株が存在した（図 3）．含有率が 6 %以上の株は，大きい方から順に”オオバグリーン”，”CFMSⒷ”，”CFMSⒶF2”，”S-18 正常ⅡⓅ”，”U-51Ⓟ”，”佐賀 6 号②Ⓟ”，”S18 正常ⅠⓅ”であった．平均炭素含有率については，最小 32.32 %から最大 38.75 %の株が存在した（図 4）．含有率が 36 %以上の株は，大きい方から順に”A-混”，”佐賀 6 号②Ⓟ”，”U-51Ⓟ”，”S-18 正常ⅡⓅ”，”オオバグリーン”，”G9Ⓟ”，”橙Ⓟ”，”CFMSⒶF2”となった．しかしながら，全ての株において，炭素含有率には大きな差は無く，多くの株で 35 % 程度以上の

表 5　選定したノリ株の培養結果（成長指数）

	株名	U-51Ⓟ	S-18正常ⅠⓅ	D-56-O	G9HG	野間3号Ⓟ	CFMSⒷF1Ⓟ	S-18正常ⅡⓅ	佐賀6号②Ⓟ	A-混
葉長	平均値	127.65	23.73	51.94	17.57	55.70	49.88	45.61	23.16	22.01
	標準偏差	21.65	8.30	16.39	6.96	21.27	13.88	18.20	11.70	6.97
葉幅	平均値	12.25	3.57	6.49	12.42	9.02	8.75	8.93	14.84	9.06
	標準偏差	2.03	0.96	1.78	3.35	2.80	2.05	2.22	5.74	1.03
長幅比	平均値	10.86	7.18	8.17	1.40	6.67	5.71	5.07	1.54	2.46
	標準偏差	3.51	3.30	2.02	0.24	3.20	0.86	1.22	0.33	0.77
葉面積	平均値	1215.01	67.27	279.98	186.66	397.63	360.80	343.95	314.97	156.73
	標準偏差	217.15	33.27	192.33	131.55	228.22	194.60	234.38	297.89	55.81

	株名	CFMSⒶ	CFMSⒷ	オオバグリーン	佐賀1号Ⓟ	G9Ⓟ	CFMSⒶF2	J-22R-1Ⓟ	橙Ⓟ	前の株 A-混Ⓟ
葉長	平均値	26.04	30.10	40.60	30.96	90.33	161.66	18.07	20.25	117.34
	標準偏差	5.03	6.08	17.52	7.83	12.92	37.65	3.63	4.39	42.49
葉幅	平均値	6.19	8.50	9.08	5.83	9.93	9.84	2.48	1.51	17.55
	標準偏差	1.99	2.08	2.03	1.22	1.83	1.87	0.32	0.44	4.52
長幅比	平均値	4.46	3.68	4.52	5.47	9.38	16.89	7.42	24.58	6.67
	標準偏差	1.29	0.89	1.60	1.53	2.09	4.75	1.92	10.38	1.32
葉面積	平均値	129.96	204.48	301.51	143.45	708.09	1254.08	35.22	24.58	1733.52
	標準偏差	67.55	80.19	196.68	55.12	186.86	374.43	8.33	10.38	1189.64

網掛けの赤色が濃い方が高値を，青色の濃い方が低値を示す．

図3　選定したノリ株の培養結果（窒素含有率）

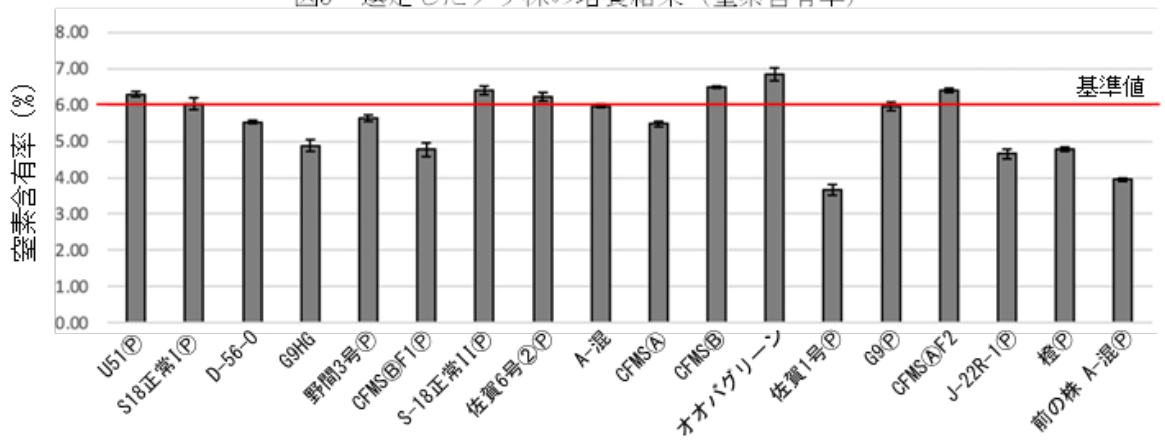


図4　選定したノリ株の培養結果（炭素含有率）

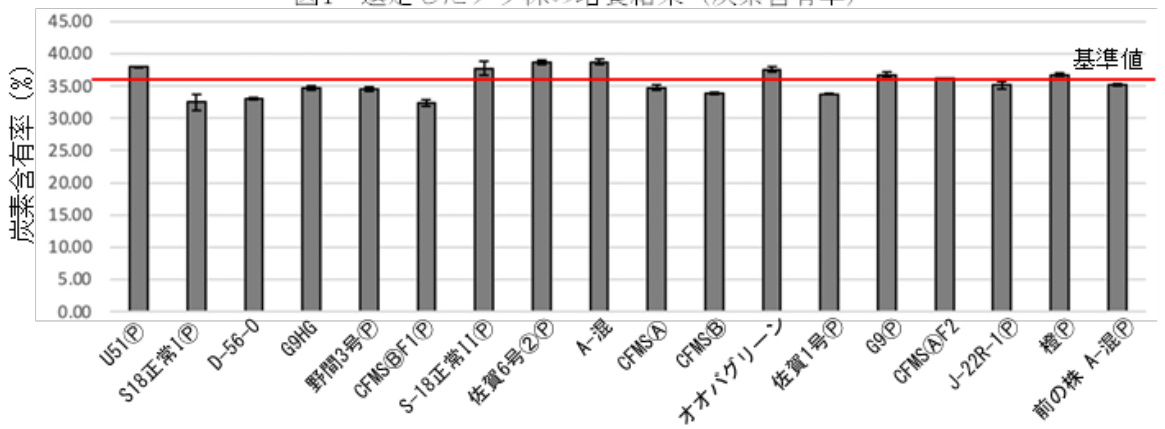


表6　選定した海苔株の培養結果（外観）



値を示していた.

窒素含有率は，海苔の色素及びタンパク質含有量と関連する．つまり，タンパク質含有量が大きければ，窒素含有率も大きくなるため，ブルーカーボン資材としてのみならず，高タンパク質食品原料としての海苔の利活用を考える上では，高窒素含有率性は重要である．

これらの結果を総合的に評価した結果，図 5 に示すように，ブルーカーボン資材と高タンパク質食品原料の両方に適するノリとして，”CFMSⒶF2”及び”U-51Ⓟ”を選抜した．なお，”CFMSⒶF2”は，色落ち耐性変異株として佐賀大学において作出された株であり，本研究により本株の新規有用性が見出された．今回試験した海苔株の外観を表 6 に示す.

3.3 PBF モデル食品の試作

佐賀県内企業のご協力により試作した PBF モデル食品「えごま生姜味噌の海苔はさみスナック」及び「Yasai Bou Nori」をそれぞれ図 6 及び図 7 に示した．「えごま生姜味噌の海苔はさみスナック」は，えごま生姜味噌を 2 枚の焼成板海苔で挟んで乾燥させたもので，味噌の原料として高オレイン酸大豆 HO1 を使用している．また，「Yasai Bou Nori」は，大豆水煮と焼成海苔粉末を生地に練りこみ焼き上げたもので，いずれの試作品も動物性原料は不使用である．今後はこれらの食品に含まれる海苔由来の成分含量やタンパク質含量を分析し，PBF としての優位性を明示する計画である.

４．おわりに

本研究では，ブルーカーボン資材としてのノリの有用性に着目し，高炭素吸収能を示すノリ品種の選抜を試みた．併せて，海藻の中でも格段に高いタンパク質含量であるノリの栄養学的特徴に着目し，高窒素吸収能を示す品種の選抜を試みるとともに，高タンパク質食品素材としてのノリの新たな活用を志向して，ノリを原料とした動物資源フリー食品（Plant Based Food；PBF）の展開可能性についても検討を行った.

その結果，長期保存株 18 種の中から，ブルーカーボン資材と PBF の両方に適するノリとして，CFMSⒶF2 及び U-51Ⓟを選抜した．この 2 株は，成長性，炭素含有率及び窒素含有率のいずれにおいても評価した中ではトップクラスの数値であった. 今後は, CFMSⒶF2 及び U-51Ⓟの栽培適性や栄養学的指標を詳細に調査し，ブルーカーボン資材に適したノリ品種の作出を目指していく．また，試作したモデル PBF 食品について，今後は栄養学的調査を実施し，PBF としてのポテンシャルを明示していくことで，ノリの PBF への応用に展開する予定である.

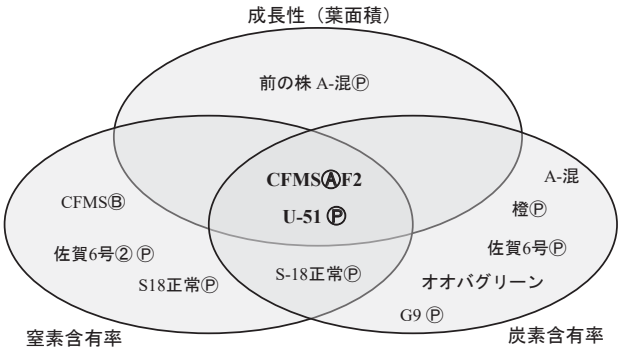


図 5　成長性及び窒素／炭素含有率を指標としたブルーカーボン資材としてノリ株の選抜



図 6　えごま生姜味噌の海苔はさみスナック



図 7　Yasai Bou

右図左側が ”SOY & NORI”

本研究の遂行にあたりご協力を賜った井手食品有限会社　鶴恵美子氏，有限会社たたら　多々良珠枝氏に多大なる感謝を申し上げる．本当にありがとうございました.

参考文献

1) 2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略 https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/pdf/green_honbun.pdf
2) 政府統計・海面漁業生産統計調査 http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/kaimen_gyosei/index.html
3) 穴井豊昭，突然変異体を用いたダイズの油脂成分改変，日本食品科学工学会誌，70 (1), 47–51 (2023)