

機能性成分を高含有する養殖オキナワモズクの探索とその保存について (モズク消費拡大に向けた機能性高含有品種育成と加工技術開発)

岩井憲司*, 吉野敦*², 須藤裕介*³

A search for culture seaweed (*Cladosiphon okamuranus* Tokida) having highly functional component, and method for preservation

Kenji IWAI*, Atsushi YOSHINO*² and Yusuke SUDO*³

沖縄で養殖されているオキナワモズク *Cladosiphon okamuranus* Tokida について、「株」が持つ形質特性の再現性の検証と機能性成分の含有量を比較するため、県内の産地海域において養殖試験を行った。その結果、母藻の形質特徴は採取した海域と別の海域においても再現性があり継代されることが示された。機能性成分はフコイダンとフコキサンチンを対象として「株」「海域」「収穫年」「収穫時期」及び「日照時間」の各項目についてこれまでの結果の比較検証を行った。その結果、養殖オキナワモズクの機能性成分の一般的な含有量は、全糖量で湿重量あたり 6.0~25.0mg/g wet weight、フコキサンチン含有量で 10~70 µg/g wet weight の範囲であると考えられた。一部の養殖試験の結果、機能性成分含有量は藻体の成長に伴い増加する傾向があり、O 株は他の株と比べて増加率が高い可能性が示唆された。しかし、全養殖試験のサンプルを分析した結果、機能性成分と「株」「海域」「収穫年」及び「日照時間」との間に相関は検出されず、「収穫時期」と弱い相関がみられた。このことから、機能性成分が高含有となる要因は「株」「海域」「収穫年」及び「日照時間」よりも「収穫時期」の影響が大きいことが示された。一方、機能性成分について、保存温度と成分の推移を比較した結果、フコイダンは安定しており、少なくとも冷蔵 5℃で 1 カ月間、冷凍 -5℃で半年間は成分を維持できることが分かった。一方、フコキサンチンは -30℃で少なくとも半年間は含有量の約 95%を、-20℃では 80~90%を維持できるが、冷蔵では不安定なことが示され、水揚げしたオキナワモズクに含まれるフコキサンチンを維持させるためには、低い温度で保存することが重要であることが分かった。

オキナワモズク *Cladosiphon okamuranus* Tokida は、本県水産業における重要な基幹養殖品目である。近年の生産量は 13,000~19,000 トンで、その生産量は沖縄県水産業全体の約半分を占める規模となっている（第 45 次沖縄県農林水産統計年報, 2015-1016）。

オキナワモズク養殖業が発展してきた背景として、先人たちの知恵と努力によって養殖技術が発展してきた側面と、多くの消費者に健康に良い食品として認知され需要が伸びてきた側面があると考えられる。特にモズクの機能性成分である「フコイダン」は、その名前が人口に膾炙するほど知名度が上がり、モズクの消費向上に大きく貢献してきた。このように、海藻に含まれる機能性成分は消費を拡大する鍵として重要な役割を持つと考えられる。消費者の健康志向の需要は今後も高くなると予想されるため、養殖オキナワモズクの機能性成分について明らかにしておくことは重要である。

沖縄の広範囲の海域で養殖されるモズクには、産地海域によって形質に特徴がみられ、海域によってモズクの形質等に差異がみられる場合がある。須藤ら（2013a, 2015ab）は、母藻の形質特徴が、採取した海域と別の海域においても再現性があり、継代されることを養殖試験によって明らかにした。

培養した種からモズク養殖を行う場合、種となる中性遊走子は母藻と遺伝的に同じクローンであり、自ら増殖するサブサイクルを持っている（図 1）。種の培養は、そのサブサイクルを利用して行っており、そうしたクローンのグループをそれぞれ「株」として扱うこととした。

この事業（2012~16 年度（平成 24~28 年度））では、「株」が持つ形質特性の検証と同時に、「株」によって機能性成分に差異があるか検証するため、沖縄県内の産地海域において養殖試験を行い、「株」に含まれる機能性成分の分析を実施してきた。期待される機能性成分としてフコイダンとフコキサンチンに着目した。2012 年度（平成 24 年度）に S2 株（S 株の接合株）と K2 株（K 株の接合株）の 2 株において、フコキサンチン含有量が顕著に高い値を示した結果を得た（須藤ほか, 2013b）。今年度は、機能性成分含有量において成績の良かった「株」について、その再現性を検証するため養殖試験を実施した。この事業でこれまで実施した結果を踏まえて養殖オキナワモズクの機能性成分含有量と「株」「海域」「収穫年」「収穫時期」及び「積算日照時間」の各項目について比較検証を行った。

また、生産地である本県では鮮度の高いモズクを利用でき

*E-mail : iwaikenj@pref.okinawa.lg.jp 現所属 : 水産海洋技術センター本所,

*² 現所属 : 一般社団法人トロピカルテクノプラス

*³ 現所属 : 水産海洋技術センター石垣支所

ることから、この優位性を活かして機能性成分を維持した加工を行うことが期待できる。機能性成分を高含有するための保存方法について比較試験を実施して検証した。

本事業中、本報では、(1) 機能性成分高含有および高生産性品種の育成と、(2) 機能性成分高含有加工技術の開発について報告する。

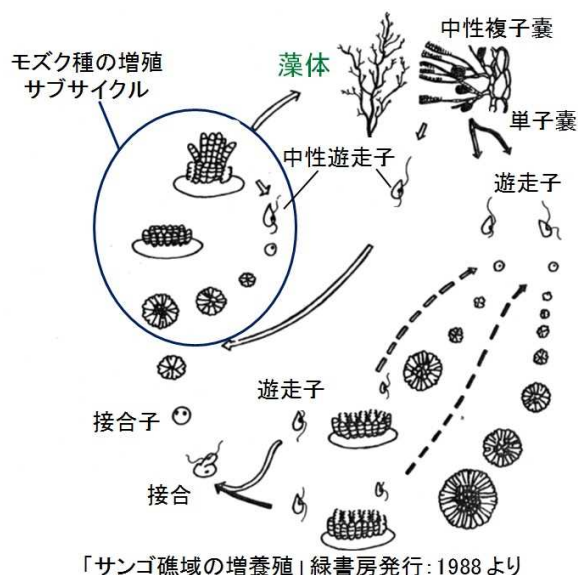


図1 オキナワモズクの種となる中性遊走子とサブサイクル（生活史）

材料及び方法

(1) 機能性成分高含有および高生産性品種の育成

1) 養殖試験

養殖試験に供するモズクの種は、これまでに沖縄の各海域から採集され沖縄県水産海洋技術センターにて単離保存している株を適宜用いた。養殖試験に用いた養殖網への採苗は、諸見里ほか（2003）の手法に準じて行った。採苗後の養殖網は、各漁場の生産者にその管理を託して、各養殖場に養殖網を設置した。その後、生育段階に応じて中間育成から本養殖に至る一連の作業を行った。養殖藻体が十分に「熟」した時期を見計らい収穫した藻体の形質の評価を須藤ほか（2010）の手法に準じて行った。また、その一部を機能性成分の分析用サンプルとして -40°C の低温冷蔵庫で保存し、適宜、機能性成分の分析に供した。今年度の養殖試験は、県内の5つの海域（伊平屋、伊是名、恩納、知念、石垣）においてS2株とK2株を対象に実施した。

本事業で実施した5年間の養殖試験の結果から、養殖オキナワモズクの機能性成分含有量と「株」、「海域」、「収穫年」、「収穫時期」、「積算日照時間」の各項目について、Spearmanの方法を用いた相関分析と一元配置分散分析(ANOVA)による比較を行った。なお、積算日照時間の算出は、気象庁のホームページより沖縄県各地観測場所の過去の気象データから抽出し、収穫の100日前から収穫日までの日ごとの日照時間を積算して求めた。各観測地は、伊是名、宮城島、糸数、久米島、宮古島、石垣島で、その中から試験海域に最も近い観測場所の気象データを用いた。

養殖期間中におけるオキナワモズクの機能性成分の推移

を比較するため、2014年（平成26年度）の恩納村で実施した養殖試験供試株4株（S株、O株、K株、C株：5/10本張り 7/1収穫）について、5月29日、6月9日、7月1日の3回機能成分分析を行った。分析は、二元配置分散分析とテューキーの多重比較（Two-way ANOVA Tukey's test）を用いた。

2) 機能性成分分析

機能性成分の分析は、一般社団法人トロピカルテクノプラスにて、フコイダンとフコキサンチンを対象に1検体につき3回実施し、その平均値を値とした。

フコイダンの分析は、検体の全糖量、ウロン酸含量、フコース含量の3項目を対象とした。

なお、分析結果の数値として、検体の乾燥重量「/g dry weight（以下、/gdw）」と水分「%」より、以下の換算式で算出した湿重量「/g wet weight（以下、/gww）」を用いた。

$$\text{湿重量} = \text{乾燥重量} \times ((100 - \text{水分}) / 100)$$

① フコイダン分析

モズク乾燥粉末 500 mg を 50 mL 遠心チューブに入れ、1N HCl 10 mL を加えて、ヒートブロックを用いて 100°C で2時間加熱抽出した。室温まで冷却した後、NaOH で中和し、50 mL に定容後、遠心分離（3,500 rpm, 15 分）を行い、上清液をモズク抽出液とした。

全糖量はフェノール硫酸法に従って測定した。試験管に前述のモズク抽出液 200 μL とフェノール試薬 200 μL を加えて攪拌し、次いで濃硫酸 1,000 μL を加え、すぐに激しく攪拌した。室温に20分以上放置した後、各試験液を96穴マイクロプレートに分注し、マイクロプレートリーダーで吸光度（490 nm）を測定した。標準物質としてグルコースを用い、グルコース相当量として全糖量を測定した。

ウロン酸含量は、カルバゾール硫酸法に従って測定した。四ホウ酸ナトリウム十水和物 0.95g を熱水 2.0 mL に溶かし、これに氷冷した濃硫酸 98 mL を攪拌しながら加え、試薬 A を調整した。また、カルバゾール 125 mg を無水エタノール 100 mL に溶かして試薬 B を調整した。前述のモズク抽出液 125 μL を氷浴中で冷やしながら氷冷した試薬 A 750 μL を攪拌しながら加え、混合液を 100°C で10分間加熱した。さらに氷冷しながら試薬 B 25 μL を加えて十分混合し、 100°C で15分間再加熱した。室温まで急冷し、525 nm の吸光度を測定した。標準物質として D-グルクロン酸（D-GlcUA）を用い、D-GlcUA 相当としてウロン酸（UA）含量を測定した。

フコース含量は、L(-)-フコースを標準品として検量線を作成し、超高速液体クロマトグラフィーで測定した。フコースの検量線は、1 $\mu\text{g/mL}$ ~ 1000 $\mu\text{g/mL}$ の濃度範囲において直線性（相関係数 $R^2 = 0.9994$ ）が得られた。前述のモズク抽出物を適宜希釈後、遠心分離し、上清液を分析に供した。

分離装置は「島津 LC-20 UFLC システム」、カラムは「Waters, BEH amide (2.0mmI.D.×150mm, 1.5 μ m)」を使用し、移動相はアセトニトリル：水 = 75 : 25、流速 1.0mL/min、温度 30°C の条件で実施した。検出器は「コロナ荷電化粒子検出 (CAD)」を用いた。

② フコキサンチン分析

分析に使用するフコキサンチン標準品は、CaroteNature 社製を用いた。

モズク乾燥粉末 (500 mg) を 50 mL ポリプロピレンチューブに精秤し、80%アセトン (20 mL) を加え、超音波処理 (5 分) した後、ホモジナイザーで抽出を行った。これをさらに超音波処理 (30 分間) した。次いで遠心分離 (3500 rpm, 5 分) し上清を分取。再度、残渣へ 80%アセトン (20 mL) 加え振とう抽出 (1500 rpm, 15 分) を行い、遠心分離 (3500 rpm, 5 分) し上清を分取し、1 回目抽出液と合わせてエバポレーターで濃縮乾固した。これにメタノール (1 mL) を加え溶解した物を HPLC 分析サンプルとした。

HPLC 分析は「島津 LC-20A UFLC システム」を使用した。以下に分離条件を示す。

Column: Shim-pack XR-ODS, 4.6×100 mm (2.2 μ m)

Oven temp.: 40°C

Detection: 450 nm

Flow rate: 0.5 mL/min flow

Injection volume: 5 μ L

Eluent: A: Water (Milli-Q water), B: CH₃CN,

Isocratic elution: 75 %B

フコキサンチンの検量線は、10 μ g/mL ~ 600 μ g/mL

の濃度範囲において直線性 (相関係数 $R^2 = 0.9999$) が得られた。

(2) 機能性成分高含有加工技術の開発

オキナワモズクと他の褐藻類の機能性成分を比較するため、市販されている海藻の乾物についてフコイダンとフコキサンチンの分析を行った。対象としたのは、沖縄県内で市販されている乾燥モズク 3 商品 (A,B,C 社)、乾燥ワカメ 1 商品 (D 社)、乾燥ヒジキ 1 商品 (E 社) 乾燥コンブ 1 商品 (F 社) の 6 商品である。

漁場から水揚げされた鮮度の高いオキナワモズクの機能性成分が、保存温度によってどのように推移するか調べた。試験に用いたオキナワモズクは、水揚げ当日に各海域にて立会の下で入手した。オキナワモズクはドライアイスの入ったクーラーボックスで輸送し、透明ポリ袋に約 100g 若しくは 200g づつに分注、真空脱気して供試験体を作成し、速やかに設定された各温度で保存した。

保存試験は 4 回実施した。各設定温度は、1 回次冷蔵 5°C、冷凍 -20°C、冷凍 -30°C、2 回次冷凍 -5°C、冷凍 -20°C、冷凍 -30°C とした。試験期間は 180 日間及び 190 日間である。3 回次は生モズクと塩蔵モズクを対象に冷蔵 4°C、冷凍 -5°C とした。期間は 7 日間として、保存初期における機能性成分の分析を行った。また、一斗缶における生モズクの冷凍 -20°C の保存状況も調べた。期間は 180 日間である。4 回次は生モズクを対象に冷凍 -5°C、冷凍 -20°C に設定し、期間は 7 日間とした。保存試験における回次毎の設定温度、保存期間、分析頻度等を表 1 に示す。

表 1 保存試験における回次毎の設定温度、保存期間、分析頻度等

回次	設定温度	海域	対象	梱包	保存期間	海域	分析回数	分析頻度 (試験開始から経過日)
1 回	冷蔵 5°C	恩納	生モズク	透明ポリ袋 (100g)	180 日間	恩納	12 回	0, 1, 4, 7, 12, 14, 21, 28, 35, 42, 120, 180 日
	冷凍 -20°C							
	冷凍 -30°C							
2 回	冷凍 -5°C	恩納	生モズク	透明ポリ袋 (100g)	190 日間	恩納	7 回	0, 7, 14, 28, 56, 120, 190 日
	冷蔵 -20°C							
	冷凍 -30°C							
3 回	冷蔵 4°C	恩納	生モズク	透明ポリ袋 (100g)	7 日間	恩納	5 回	0, 1, 2, 5, 7 日
	冷蔵 -5°C		塩蔵モズク					
	冷凍 -20°C		生モズク	一斗缶	180 日間	恩納	4 回	0, 30, 90, 180 日
4 回	冷凍 -5°C	知念	生モズク	透明ポリ袋 (100g)	7 日間	知念	3 回	0, 2, 7 日
	冷蔵 -20°C							

結 果

(1) 機能性成分高含有および高生産性品種の育成

今年度の養殖試験において、収穫に至った回数は S2 株で 3 回、K2 株で 5 回であった。供試株の K2 株と S2 株の計数的形質を表 2 に示す。同じ期間に同じ漁場で実施した伊是名 2 回次の K2 株と S2 株において藻体長、太さ、破断強度に統計的な差は認められなかった。

本事業で実施した養殖試験のなかで機能性成分の分析を行った回数は総数 127 回で、対象とした株数は 15 株、海域は 8 か所であった。サンプルを収穫した期間は 2 月から 7 月であった。その詳細と各試験回数を表 3 に示す。

フコイダン分析の対象項目とした全糖量、ウロン酸含量、フコース含量について、全糖量×ウロン酸含量で強い相関があり (図 2, $p < 0.01$ $r = 0.82$)。全糖量×フコース含量、ウ

表2 K2株とS2株における計数的形質 (H28)

回数	株	海域	収穫 月日 (H28)	藻体長		太さ				破断強度			
				(cm)		主軸 (mm)		一次側枝 (mm)		主軸 (N)		一次側枝 (N)	
				ave.	SD	ave.	SD	ave.	SD	ave.	SD	ave.	SD
1	S2	知念	2/17	30.7	± 7.1	1.7	± 0.3	1.6	± 0.3	8.5	± 1.9	6.6	± 2.2
2	K2	伊是名	3/23	31.4	± 3.8	1.6	± 0.2	1.3	± 0.2	10.9	± 2.8	6.7	± 1.9
	S2	伊是名		28.8	± 3.2	1.5	± 0.2	1.2	± 0.2	11.0	± 3.2	5.4	± 1.7
3	K2	伊平屋	4/12	23.0	± 3.7	1.8	± 0.2	1.5	± 0.3	11.6	± 1.5	7.9	± 3.4
4	K2	伊是名	4/19	25.5	± 4.9	1.8	± 0.1	1.4	± 0.2	19.5	± 1.9	10.1	± 4.9
5	K2	恩納村	5/3	16.8	± 3.4	1.4	± 0.5	1.4	± 0.3	7.9	± 2.4	5.9	± 3.2
6	S2	石垣	5/31	49.4	± 6.2	1.9	± 0.4	1.2	± 0.2	11.3	± 1.7	7.4	± 1.9
7	K2	伊平屋	6/11	43.1	± 9.7	2.2	± 0.4	1.9	± 0.2	15.2	± 4.1	11.3	± 3.1

表3 機能性成分の分析を行った養殖試験の年、株、海域、収穫月と各試験回数

試験年	回数	株名	回数	試験海域	回数	収穫月	回数
平成24年	27 回	A株	10 回	伊平屋	8 回	2月	6 回
平成25年	31 回	C株	13 回	伊是名	19 回	3月	9 回
平成26年	42 回	K株	24 回	本部	9 回	4月	57 回
平成27年	9 回	K2株	8 回	恩納	47 回	5月	34 回
平成28年	18 回	KO株	4 回	知念	8 回	6月	17 回
		O株	18 回	久米島	15 回	7月	4 回
		O2株	2 回	宮古	3 回		
		OS株	5 回	石垣	18 回		
		S株	22 回				
		S2株	10 回				
		SK株	1 回				
		IH株	5 回				
		G株	3 回				
		MM株	1 回				
		ハリガネ株	1 回				

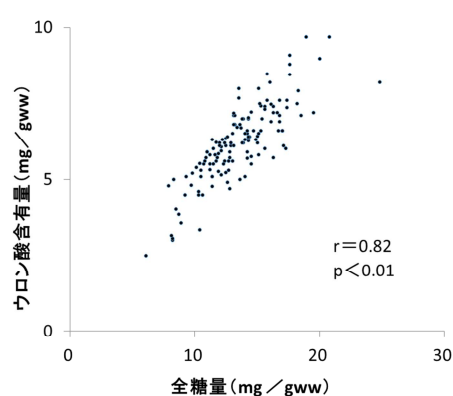


図2 全糖量とウロン酸含有量の相関

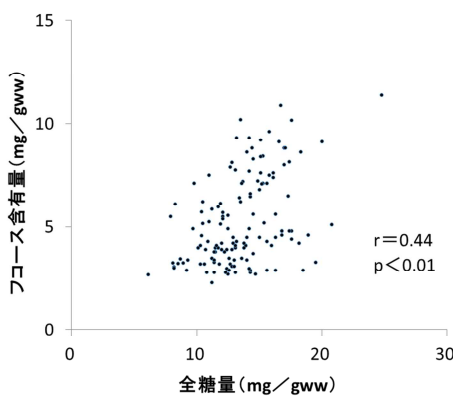


図3 全糖量とフコース含有量の相関

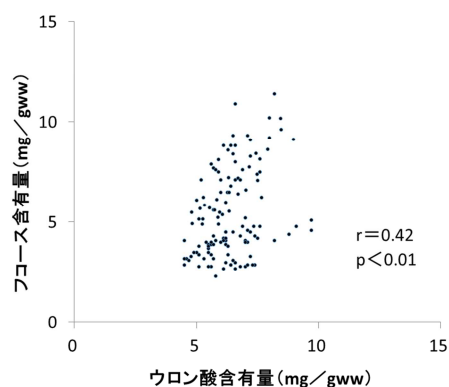


図4 ウロン酸含有量とフコース含有量の相関

ロン酸含量×フコース含量では、弱い相関がみられた (図3, $p<0.01$ $r=0.44$) (図4, $p<0.01$ $r=0.42$).

全糖量とフコキサンチン含有量について127検体の分析結果と、「株」、「海域」、「収穫年」、「収穫時期」、「積算日照時間」の各項目に傾向がみられないかを検証を試みた。その結果、機能性成分と各「株」、各「海域」、各「収穫年」及び「積算日照時間」との間に相関又は有意差は検出されず、「収穫時期」について以下のような傾向が検出された。全糖量×収穫

月 (図5, $p<0.01$ $r=0.38$), フコキサンチン含有量×収穫月 (図6, $p<0.01$ $r=0.31$) の間で弱い相関がみられた。4月～6月のフコキサンチン含有量を比較すると、4月の $26.8 \pm 10.1 \mu\text{g/gww}$ ($n=59$) と6月の $40.5 \pm 13.5 \mu\text{g/gww}$ ($n=19$) の間と5月の $28.3 \pm 12.3 \mu\text{g/gww}$ ($n=34$) と6月の間に有意な差がみられた (図7, ANOVA $p<0.01$, Tukey 多重比較 $p<0.01$).

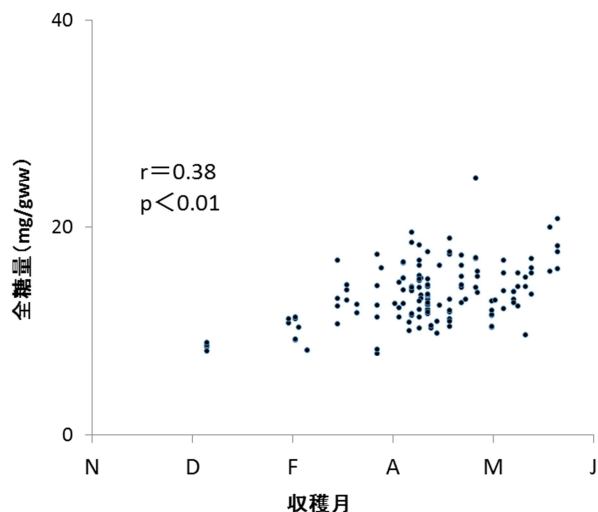


図5 収穫月と全糖量の相関

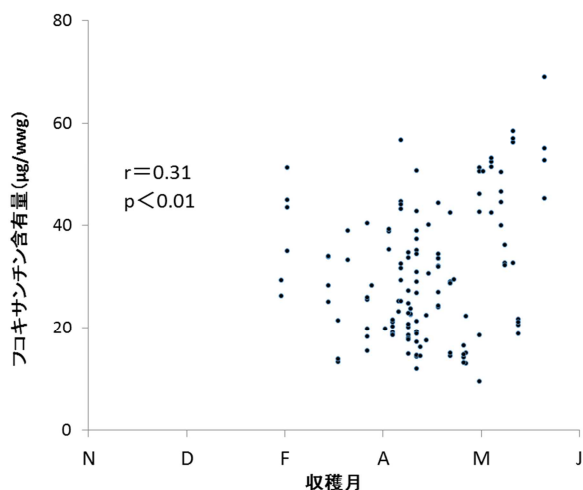


図6 収穫月とフコキサンチン含有量の相関

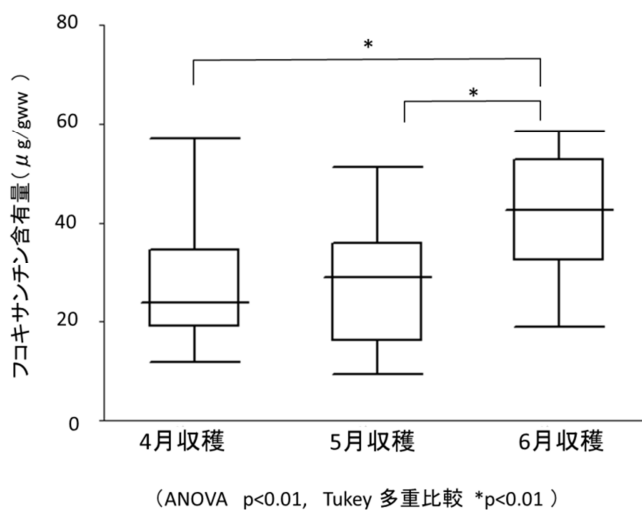


図7 収穫月とフコキサンチン含有量の比較 (4-6月)

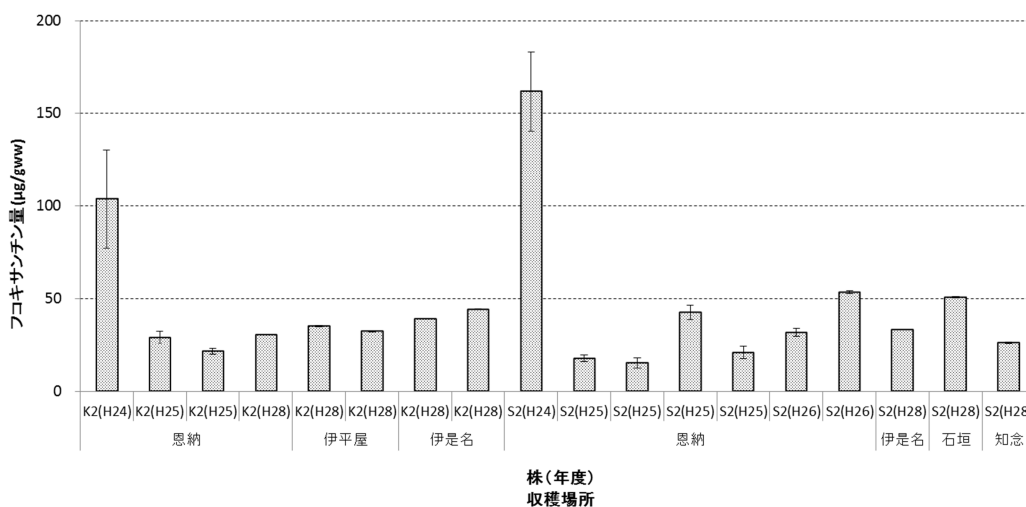


図8 K2株とS2株におけるフコキサンチン含有量 (H24-H28)

養殖期間中の各株における全糖量含有量の推移を図9に示す。7月における株間の全糖量を比較すると、O株がC株、K株、S株より有意に高かった (C株: $p<0.05$, K株, S株: $p<0.01$)。また、モズクの成長と全糖量の推移をみると、同株の5月又は6月の全糖量と7月の全糖量に、全ての株において有意な差が認められた ($p<0.01$)。養殖期間中の各株におけるフコキサンチン含有量の推移を図10に示す。7月に

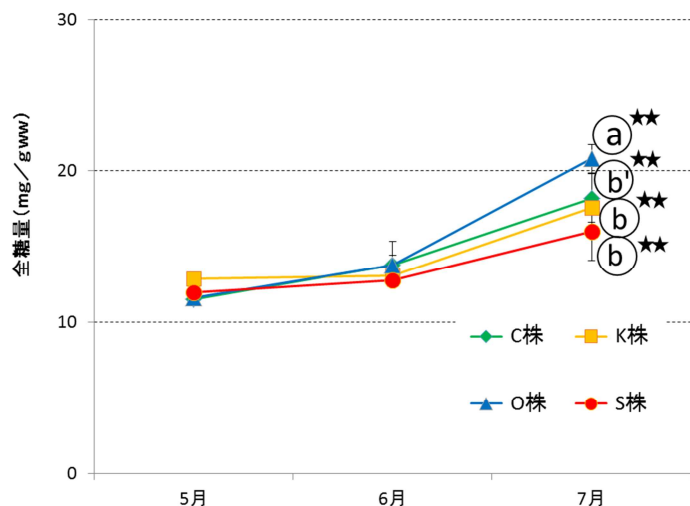


図9 養殖期間中における供試株の全糖量の推移

Two-way ANOVA Tukey's test:

a,bは株間における7月の全糖量に有意差が検出されたことを示す:

a>b: $p<0.05$ a>b: $p<0.01$

○は同株における5月又は6月の全糖量と7月の全糖量に有意差が検出されたことを示す:

★★ $p<0.01$

における株間のフコキサンチン含有量を比較すると、O株がC株、K株、S株より有意に高かった ($p<0.01$)。また、モズクの成長とフコキサンチン含有量の推移をみると、同株の5月又は6月の含有量と7月の含有量に、O株、C株、S株において有意な差が認められた (C株: $p<0.05$, O株, S株: $p<0.01$)。

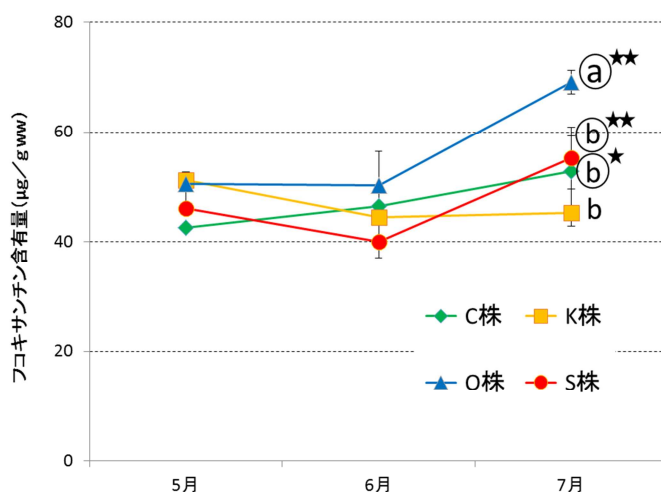


図10 養殖期間中における供試株のフコキサンチン含有量の推移

Two-way ANOVA Tukey's test:

a,bは株間における7月の全糖量に有意差が検出されたことを示す:

a>b: $p<0.01$

○は同株における5月又は6月の含有量と7月の含有量に有意差が検出されたことを示す:

★ $p<0.05$ ★★ $p<0.01$

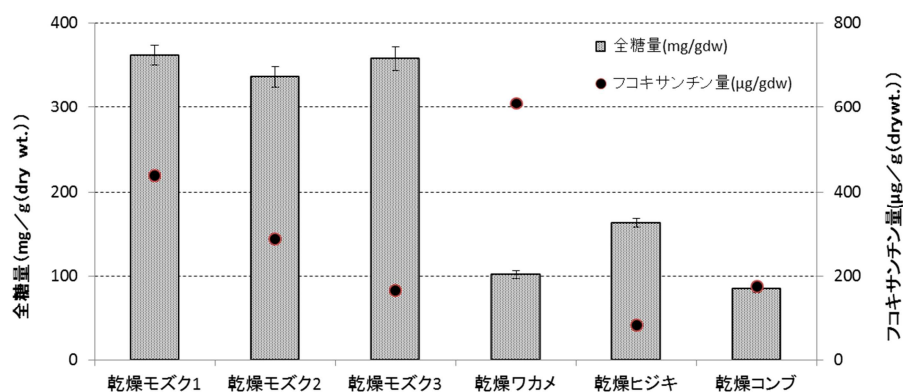


図11 市販海藻乾物の全糖量とフコキサンチン含有量

(2) 機能性成分高含有加工技術の開発

市販されている海藻乾物の全糖量は、乾燥重量あたり乾燥モズク 336.1~362.1 mg/gdw で、乾燥ワカメ 162.6 mg/gdw, 乾燥ヒジキ 85.1 mg/gdw, 乾燥コンブ 101.6 mg/gdw となり、乾燥モズクが他の褐藻類と比較して高い値を示した (図11)。フコキサンチン含有量は、乾燥重量あたり乾燥モズク 165.8~438.0 μg/gdw とバラつきが大きく、他の褐藻

類は、乾燥ワカメ 608.1 μg/gdw, 乾燥ヒジキ 81.0 μg/gdw, 乾燥コンブ 174.7 μg/gdw となり、乾燥ワカメの値が他の商品より高かった (図11)。

保存試験1回次は、開始時の全糖量 10.1mg/gww は僅かな変動はみられるもののほぼ横這いで推移し、180日後の終了時で冷凍-20℃, -30℃ともに 9.7mg/gww となった。冷蔵5℃は42日で後述する理由により試験を終了し、その時

*E-mail: iwaikenj@pref.okinawa.lg.jp 現所属: 水産海洋技術センター本所,

*2 現所属: 一般社団法人トロピカルテクノプラス

*3 現所属: 水産海洋技術センター石垣支所

点で 10.5mg/gww と開始時とほぼ同じ値であった (図 12). フコキサンチン含有量は、開始時 $25.1\mu\text{g/gww}$ で、冷蔵 5°C は開始から直ぐに減少し始め 1 週間後に $17.7\mu\text{g/gww}$, 1 ヶ月後には約 $10\mu\text{g/gww}$ まで落ち込んだため 42 日で試験を終了した. -20°C 及び -30°C は、1 ヶ月を過ぎたあたりから若干減少気味に推移し、180 日後の終了時に冷凍 -20°C で $19.9\mu\text{g/gww}$, 冷凍 -30°C で $23.7\mu\text{g/gww}$ となった (図 13).

保存試験 2 回次は、開始時の全糖量は 22.7mg/gww は殆ど変動することなく推移し、190 日後の終了時で $19.0\sim 21.0\text{mg/gww}$ となった (図 14). フコキサンチン含有量は、開始時 $32.3\mu\text{g/gww}$ で、冷凍 -5°C は開始から減少するが、2 週間後に $23.2\mu\text{g/gww}$ となった後の減少は緩慢となり、終了時は $19.4\mu\text{g/gww}$ であった. -20°C と -30°C は共に横這いに推移し、終了時に冷凍 -20°C で $29.8\mu\text{g/gww}$, 冷凍 -30°C で $31.4\mu\text{g/gww}$ となった (図 15).

保存試験 3 回次は、生モズクの開始時の全糖量は 12.4mg/gww で、若干増加するもののほぼ横這いに推移し、終了時 7 日目に冷蔵 4°C で 14.7mg/gww , 冷凍 -5°C で 16.2mg/gww となった. 塩蔵モズクの開始時の全糖量は 17.6mg/gww で、若干減少するもののほぼ横這いに推移し、終了時 7 日目に冷蔵 4°C で 13.5mg/gww , 冷凍 -5°C で 14.5mg/gww となった (図 16). フコキサンチン含有量は、生モズクで開

始時 $48.5\mu\text{g/gww}$ やや減少して横這いに推移し、終了時 7 日目に冷蔵 4°C で $37.3\mu\text{g/gww}$, 冷凍 -5°C で $39.6\mu\text{g/gww}$ となった, 塩蔵モズクは開始時 $64.6\mu\text{g/gww}$ で、3 割程度減少して横這いに推移し、終了時 7 日目に冷蔵 4°C で $37.6\mu\text{g/gww}$, 冷凍 -5°C で $41.8\mu\text{g/gww}$ となった (図 17). 一斗缶の保存状況は、開始時の全糖量 12.4mg/gww , は減少することなく 180 日後の終了時に 13.1mg/gww となった. フコキサンチン含有量は開始時 $48.5\mu\text{g/gww}$ で横這いに推移し、終了時は $43.5\mu\text{g/gww}$ であった (図 18).

保存試験 4 回次は、開始時全糖量 12.7mg/gww は冷凍 -5°C , -20°C とともに減少なく推移し、7 日後の終了時で $13.2\sim 13.4\text{mg/gww}$ となった (図 19). フコキサンチン含有量は、開始時 $38.7\mu\text{g/gww}$ で、冷凍 -5°C は開始からやや減少し終了時に $30.1\mu\text{g/gww}$ となり、冷凍 -20°C は -5°C より減少の割合が少なく $34.7\mu\text{g/gww}$ となった (図 19).

試験結果から、全糖量は 1 回次冷蔵 5°C で 42 日間、冷凍 -20°C 及び -30°C で 180 日間、2 回次冷凍 -5°C , -20°C 及び -30°C で 190 日間、3 回次一斗缶冷凍 -20°C で 180 日間、殆ど減少することなく開始時の値の 90% 以上の含有量を維持していた. 一方、フコキサンチンは 1 回次冷凍 -30°C の 180 日間、2 回次冷凍 -20°C 及び -30°C の 190 日間、殆ど減少することなく開始時の値の 90% 以上の含有量を維持していた.

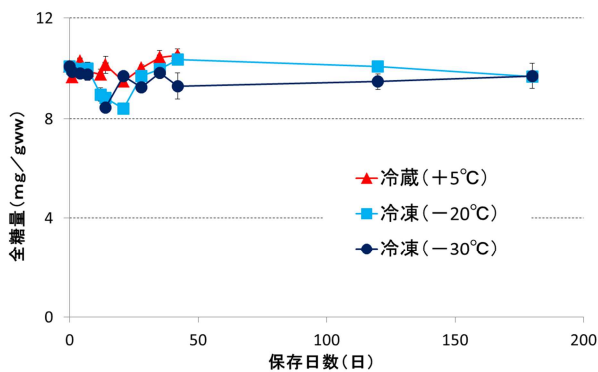


図 12 保存試験 1 回次における全糖量の推移

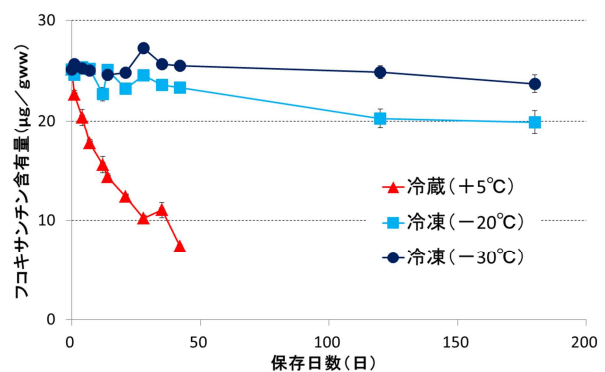


図 13 保存試験 1 回次におけるフコキサンチン含有量の推移

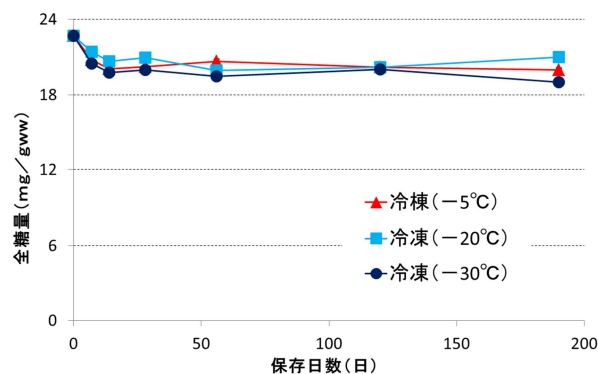


図 14 保存試験 2 回次における全糖量の推移

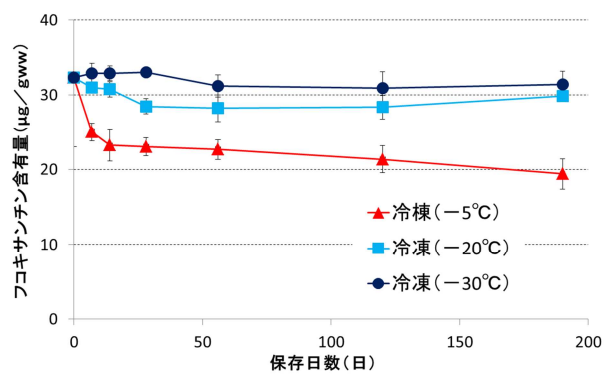


図 15 保存試験 2 回次におけるフコキサンチン含有量の推移

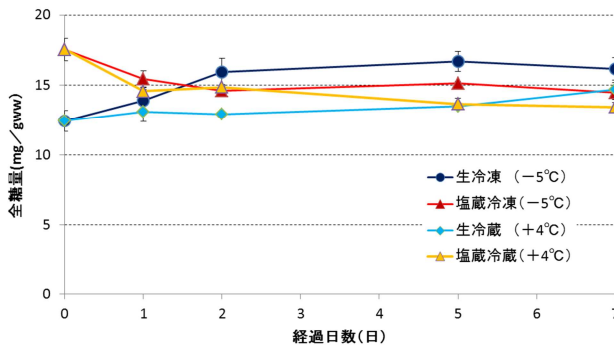


図 16 保存試験 3 回次における全糖量の推移

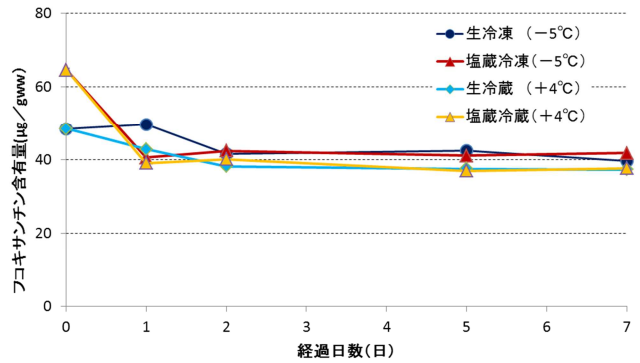


図 17 保存試験 3 回次におけるフコキサンチン含有量の推移

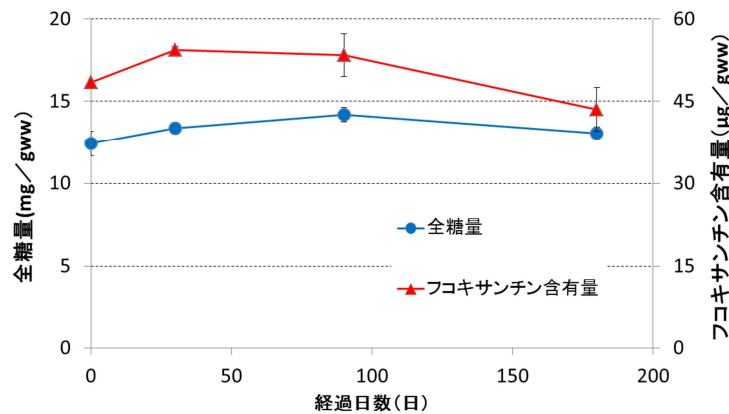


図 18 一斗缶における全糖量とフコキサンチン含有量の推移

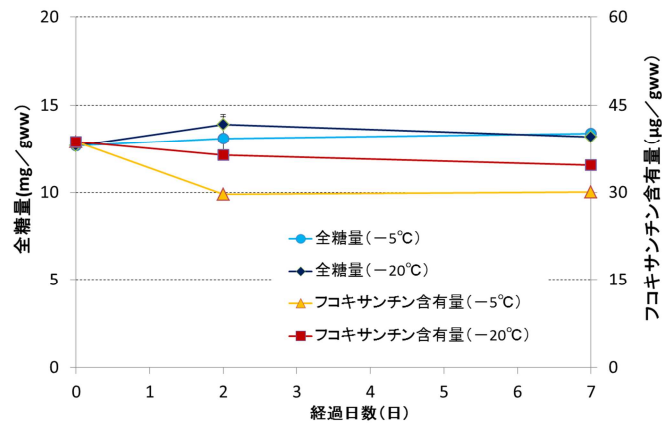


図 19 保存試験 4 回次における全糖量とフコキサンチン含有量の推移

考 察

(1) 機能性成分高含有および高生産性品種の育成

今年度の養殖試験において、供試株の形質的比較に統計的な差は認められなかった。しかし、結果の全体を俯瞰してみると藻体長では S2 株が長く、太さと破断強度では K2 株が高く、この傾向は過去の結果と一致する（岩井ほか，2017；須藤ほか，2013a,2015ab）。これらのことから、元の株の形質特徴は別の海域においても再現性があり、継代されると考えられた。

フコイダンは、褐藻類に含まれている硫酸化多糖類で、フコースを構成糖とした基本骨格を持つ天然高分子化合物で

ある。褐藻類から抽出されたフコイダン含有物におけるフコイダン量の計算法として、定められた測定法で得られた「フコース含有量」「グルクロン酸（ウロン酸）含有量」「硫酸根含有量」「硫酸基結合カチオン含有量」の値の和と規定している（フコイダン食品品質規格基準，2017）。今回、オキナワモズク藻体に含まれるフコイダン量として、全糖量、ウロン酸含有量、フコース含量を測定したところ、全糖量×ウロン酸に強い相関、全糖量×フコース含量、ウロン酸含量×フコース含量に弱い相関がみられたため、フコイダンの指標として考察する項目は全糖量に絞ることとした。オキナワモズクにはフコイダン以外の多糖はほとんど存在しないものと

考えられ(長岡ほか, 2003), 全糖量はフコイタン量を反映しているとみなした。

当事業で分析した全糖量の結果から, 養殖オキナワモズクの一一般的なフコイタン含有量は湿重量あたり $6.0\sim 25.0\text{mg/gww}$ の範囲と考えられ, 収穫する時期が遅くなるに従ってその含有量が高くなり, 成長に伴って含有量が増加する傾向が示された。須藤ほか(2012)は, 養殖オキナワモズクのフコイタン含有量の季節変動を全糖量とウロン酸量を測定することで調べた結果, 養殖初期の1~2月で低く収穫時期の4~5月で最も高くなることを報告しており, 今回の結果と一致する。養殖シーズンの後半にフコイタン含有量が高くなる要因として, 日照時間の影響が考えられるが, 「積算日照時間」と「全糖量」に相関は認められなかった。これらのことから, オキナワモズクがフコイタンを高含有する要因は「株」や「海域」よりも「収穫時期」に影響を受けることが示された。その要因は, 日照時間以外の水温や栄養塩等の環境の可能性のあるのではないかと考えられる。

鮮橙色の色素成分(カロテノイド)の1種であるフコキサンチンは, 褐藻類が特異的に生産するキサントフィルであり, 抗酸化や抗肥満等の機能性作用が報告されている。フコキサンチンもフコイタンと同様に, 収穫期後半なるにしたがってその含有量が高くなり, 成長に伴って含有量が増加する傾向が示された。一部の事例として, 2014年に恩納村で実施した養殖試験では, O株は, C株, K株, S株に比べて, 全糖量及びフコキサンチンの含有量の増加率が高いことが示された。この試験の時期は, 本張りから収穫までが5月から7月と, モズク養殖シーズンの終盤であった。そのため, O株は機能性成分の含有率が高くなる養殖時期の終盤において, 含有量が高くなる可能性が示唆された。

2012~16年度(平成24~28年度)にかけて実施したフコキサンチン含有量の分析は $9.5\sim 161.8\mu\text{g/gww}$ の範囲であった。しかし, 顕著に高かった(2012年度)平成24年度のS2株の $161.8\mu\text{g/gww}$ とK2株の $103.9\mu\text{g/gww}$ を除くと, その範囲は $9.5\sim 69.1\mu\text{g/gww}$ である。金沢(2008)は, 褐藻類のフコキサンチン含有量を, 生鮮海藻の湿重量あたりおよそコンブ $190\mu\text{g/gww}$, ワカメ $110\mu\text{g/gww}$, アラメ $75\mu\text{g/gww}$, ホンダワラ $65\mu\text{g/gww}$, ヒジキ $22\mu\text{g/gww}$ と報告している。吉本ほか(2012)は, ワカメのフコキサンチン含有量を基準に品種選抜を試みたところ, その含有量は乾燥重量あたり $930\sim 1,230\mu\text{g/gdw}$ で, サイズ, 収穫時期よりも海域の環境に左右されると推察している。生ワカメに含まれる水分量が89.0%(日本食品標準成分表(七訂), 2015)として換算すると, その湿重量は約 $102.3\sim 135.3\mu\text{g/gww}$ である。これらのことから, 養殖オキナワモズクの一一般的なフコキサンチン含有量は $10\sim 70\mu\text{g/gww}$ 程度で, 生鮮状態だとワカメやコンブより低いと考えられた。また, フコキサンチン含有量が $100\mu\text{g/gww}$ を超えることも稀にあるが, それは「株」の特性ではなく別の要因に由来する可能性が高いと考えられた。

以上のように, 2012年から2016年まで5年間の養殖試験

の結果から, フコイタンとフコキサンチンの含有量に及ぼす要因は, 「株」「海域」「積算日照時間」よりも「収穫時期」の影響が大きいと考えられた。

(2) 機能性成分高含有加工技術の開発

酒井ほか(2003)は, 様々な海藻からフコイタンを調整した結果, オキナワモズクのフコイタン含有量は乾燥重量で 250mg/gdw となり, コンブ $15\sim 40\text{mg/gdw}$ やワカメ $15\sim 80\text{mg/gdw}$ と比べて含有量が高いことを示している。今回測定した市販の乾燥モズクの全糖量は3商品とも他の褐藻類の商品と比べて全糖量が高く, 上記の報告と同様の結果となった。乾物の海藻商品において他の海藻と比べてオキナワモズクはフコイタン含有量が顕著に高いと言える。

色素成分であるフコキサンチンは, 熱, 乾燥, 光, 酸化などの諸条件に対して不安定なため加工段階で含有量が減少すると予測される。褐藻類を乾物加工すると, 生鮮海藻の湿重量あたり $190\mu\text{g/gww}$ だったコンブのフコキサンチン含有量は $22\mu\text{g/gww}$ に, $110\mu\text{g/gww}$ のワカメは $84\mu\text{g/gww}$ に, 他の海藻は検出以下に減少する(金沢, 2008)。今回の測定では, 乾燥モズクのフコキサンチン含有量は検出されたが, 乾燥ワカメの値よりは低かった。上記の報告では, ワカメが乾物加工される際に減少するフコキサンチン含有量の割合は比較的少ない。今回, 乾燥ワカメの値が他の褐藻類と比較して高かったことから, ワカメに含まれるフコキサンチンは他の褐藻類のものと比べて安定性が高い可能性があると考えられた。乾燥モズクは乾燥ワカメに次いで含有量が多く, 比較的フコキサンチン含有量の高い加工品を生産できる可能性が示された。

水揚げした鮮度の高いオキナワモズクの機能性成分を高含有した状態で維持できる保存温度を検証するため, 保存試験を実施した。天然高分子化合物であるフコイタンは, 保存温度に対して安定していると予測される。予測通り, 試験期間中に全糖量が減少するのは3回次の塩蔵モズクの例だけで, 他の全ての検体は試験終了時まで開始時の全糖量の値を維持していた。3回次の塩蔵モズクと生モズクの開始時, 塩蔵モズク的全糖量が生モズクに比べて高くその後減少するのは, 塩蔵初日にモズクが脱水し水分が比較的少ないためで, その後水分を含み数値が生モズクの値に近づき安定すると考えられる。これらのことから, 養殖オキナワモズクにおいて水揚げ時の全糖量含有量を維持する条件は, 冷蔵 5°C で約1ヶ月間, 冷凍 -20°C 及び -30°C で約半年間, 冷凍 -20°C 一斗缶冷凍で約半年間, 冷蔵 4°C 塩蔵で1週間であることが示された。

一方, フコキサンチン含有量の試験結果をみると, 1回次では冷蔵 5°C で急落し, 冷凍 -20°C , -30°C で180日後に開始時の79.1%, 94.4%の含有量をそれぞれ維持していた。2回次は冷凍 -5°C , -20°C 及び -30°C で180日後に開始時の60.0%, 92.3%, 97.3%の含有量をそれぞれ維持していた。3回次では一斗缶冷凍 -20°C で180日後に開始時の89.8%を, 4回次は冷凍 -5°C , -20°C で7日後に開始時の77.8%,

89.7%の含有量をそれぞれ維持していた。3 回次の塩蔵モズクの値が生モズクと比べて開始時に高くその後減少して生モズクの値に近づき安定するのは、前述した全糖量と同様の理由と考えられる。塩蔵モズク、生モズクともに冷蔵 4℃、冷凍-5℃で 7 日後、フコキサンチン含有量は冷蔵 4℃生モズクで開始時の 77.0%、冷凍-5℃生モズクで開始時の 81.8% 値を維持していた。これらのことから、養殖オキナワモズクにおいて水揚げ時のフコキサンチン含有量を維持する条件は、保存温度が低くなるに従って含有率が高くなり、冷凍-30℃では半年間で約 95%、冷凍-20℃ではその率は 80～90%になることが示された。大橋ほか (2011) は、収穫後直ぐに-20℃に冷凍保存したマコンブと乾燥コンブを原料として、佃煮製品に加工して残存したフコキサンチンを比較したところ、冷凍コンブを原料とした製品が乾燥コンブの 1.5 倍多かったことを報告している。オキナワモズクも収穫後直ぐに-20℃以下の冷凍保存をすることで、機能性成分であるフコキサンチンを高含有したまま維持できることが明らかになった。

冷蔵 5℃での 1 ヶ月間を超える長期保存は含有するフコキサンチンを著しく減少させる。保存初期の 7 日後に焦点をあてて比較してみても、表 4 に示すように冷蔵 4～5℃で 70～77%、冷凍-5℃で 77～81%、冷凍-20℃で 80～100%、冷凍-30℃で 100%となり、冷蔵では約 3 割の含有量を失っていることが分かる。フコキサンチン含有量の維持のために保存温度を低く設定することが重要である。

表 4 保存試験 7 日後における フコキサンチン含有量の維持率

保存温度	1 回次	2 回次	3 回次	4 回次
冷蔵 4～5℃	70.5%	—	77.0%	—
冷凍 -5℃	—	77.4%	81.8%	77.8%
冷凍 -20℃	100%	95.9%	—	89.7%
冷凍 -30℃	100%	100%	—	—

—：試験無し

養殖オキナワモズクの機能性成分について、保存温度と成分の推移を比較した結果、フコイダンは安定しており、少なくとも冷蔵 5℃で 1 ヶ月間、冷凍-5℃で半年間は成分を維持できることが分かった。一方、フコキサンチンは比較的不安定であるが、-30℃で少なくとも半年間は含有量の約 95% を、-20℃では 80～90%を維持できることが分かった。また、冷蔵 4～5℃だと、保存初期の 7 日間で約 3 割の含有量を失うことが示され、水揚げしたオキナワモズクに含まれるフコキサンチンを維持させるためには、低い温度で保存することが重要であることが分かった。

文 献

岩井憲司, 須藤裕介, 2017: モズク消費拡大に向けた機能性高含有品種育成と加工技術開発 (機能性成分高含有および高生産性品種の育成)。平成 26 年度沖縄県水産海洋技術

センター事業報告書, 76, 1-1.

大橋聡, 木下康宜, 戸田登志也, 2011: コンブの貯蔵および加工処理によるフコキサンチン含有量の変化。第 65 回日本栄養・食糧会大会要旨。3I-09P.

金沢和樹, 2008: フコキサンチン fucoxanthin。日本食品科学工学会誌, 55(4), 194-194.

公益財団法人日本健康・栄養食品協会, 2017: フコイダン食品 品質規格基準 (公示 No.69)。18pp.

酒井武, 佐川祐章, 加藤郁之進, 2003: 機能性食品としてのフコイダン: その構造と生物活性。藻類, 51(1), 19-25.

諸喜田茂充 編著, 1988: サンゴ礁域の増養殖, 緑書房, 東京, 58pp.

須藤裕介, 楠元俊英, 泉水仁, 直木秀夫, 安元健, 諸見里聰, 2007: オキナワモズク粘液多糖類含有量の季節変動 (モズク 類生育指標探索試験)。平成 17 年度沖縄県水産試験場事業報告書, 67, 162-164.

須藤裕介, 山田真之, 比嘉義視, 名嘉治市, 2010: オキナワモズクの系統選抜に向けた予備的調査 (もずく類養殖技術改良試験・マリンバイオ産業創出事業)。平成 21 年度沖縄県水産海洋研究センター事業報告書, 71, 23-26.

須藤裕介, 山田真之, 2013a: オキナワモズク選抜育種試験。平成 24 年度沖縄県水産海洋研究センター事業報告書, 74, 14-14.

須藤裕介, 松尾和彦, 渡嘉敷唯章, 吉野敦, 池端真美, 2013b: モズク消費拡大に向けた機能性高含有品種育成と加工技術開発 (機能性成分高含有加工技術の開発 I)。平成 24 年度沖縄県水産海洋研究センター事業報告書, 74, 15-15.

須藤裕介, 松尾和彦, 2015a: モズク消費拡大に向けた機能性高含有品種育成と加工技術開発 (機能性成分高含有および高生産性品種の育成)。平成 25 年度沖縄県水産海洋技術センター事業報告書, 75, 11-11.

須藤裕介, 岩井憲司, 2015b: オキナワモズク選抜育種試験 (沖縄県産業振興重点研究推進事業)。平成 25 年度沖縄県水産海洋技術センター事業報告書, 75, 10-10.

内閣府沖縄総合事務局農林水産部, 2015-2016: 第 45 次沖縄農林水産統計年報。漁業生産量及び生産額, 189pp 197pp.

長岡正人, 上山貞夫, 柴田英之, 高木逸子, 相山律男, 橋本秀介 2003: 沖縄モズク由来フコイダンの性状, 定量法およびその効果について。ヤクルト研究所研究報告集 (23), 1-12.

文部科学省科学技術・学術審議会資源調査分科会, 2015: 日本食品標準成分表 2115 年版 (七訂)。9 藻類, 116 pp.

諸見里聰, 我部政佑, 鈴木元 2005: オキナワモズク人工苗床試験。平成 15 年度沖縄県水産試験場事業報告書, 65, 139-141.

吉本亮子, 棚田教生, 加藤慎治, 2012: フコキサンチン含有量に関するワカメ品種の評価。徳島県立工業技術センター研究報告, (21), 39-4