

ワカメ加工業における物質フロー解析とゼロエミッション化技術

藤井 紳一郎*・伊永 隆史**

摘 要

本研究では、ワカメ養殖加工業から発生する芽株、茎、根などのワカメ未利用物について、その発生量などを明らかにすると共に、ワカメ加工業における物質収支フローチャートを作成した。物質フロー解析結果から、ワカメ未利用物は微生物分解が可能であると判断し、低環境負荷型生物分解システムを開発した。また、熱水抽出法及び炭酸ナトリウム溶解法を用い、ワカメ未利用物からの有効成分分離利用技術を開発した。特に、熱水抽出法により得られた抽出物の分析を行い、免疫賦活物質（ α -1,3-グルカン）の含有が確認された。得られた免疫賦活物質について、バキュロウイルス感染クルマエビへの投与試験を行った結果、免疫賦活物質無投与区画では20日後に100%死滅したのに対し、免疫賦活物質投与区画では最高90%の生存率が確認された。実用化可能な免疫力向上性が確認されたため、クルマエビ養殖用餌への免疫賦活添加剤としての利用を検討した。その他、炭酸ナトリウム溶解法により得られた、粗繊維質成分への酵素（セルラーゼ）処理を行うことで、オリゴ糖生産を行った。ワカメ未利用物からの有効成分分離及びその利用について検討し、ワカメ養殖加工で全国3位の実績を誇る、徳島地域における同業種でのゼロエミッション化ネットワークの形成と、その可能性を示した。同時に、熱水抽出法により得られる免疫賦活物質のクルマエビ等養殖用餌添加剤としての利用を前提に、全国的なゼロエミッション化ネットワークの構築についても検討した。

キーワード: ゼロエミッション, ワカメ, 物質フロー, 生物分解, 免疫賦活物質

1. はじめに

ワカメは日本人一人あたり年間約2kgを消費し、そのほとんどが養殖で生産されている。ワカメ養殖・加工業は全国各地で展開されているが、ワカメは特に岩手、宮城、徳島の3県を中心に生産されている^{1,2)}。全国第3位の生産量を誇る徳島県でのワカメ養殖・加工業は、表1に示すように徳島県内の重要な地場産業として根付いている^{2,3)}。ワカメの食用部は主に葉部であり、茎や芽株についてはごく一部を生や佃煮として利用するのみである。根に関しては全く利用されておらず、茎、芽株と同様に未利用物として収穫時に大量発生するので、業者はその処理問題に苦慮している。1980年のロンドン・ダンプン条約批准に伴い、ワカメ未利用物は陸上での処理を余儀なくされたが、一部管理区画での埋め立て以外有効な解決策は講じられていない。

本研究ではワカメ養殖加工業から発生するワカメ未利用物について、ワカメ加工工程における未利用

物等の物質収支フローを解析し、ワカメ未利用物の低環境負荷型生物分解システムを開発する。また、未利用物からの有効成分分離技術を開発し、利用形態を検討することにより、徳島地域内における同業種でのゼロエミッション化について検討する。さらに、他地域を含めた徳島地域内外でのゼロエミッション化のネットワーク構築を試みる。

表1 全国ならびに徳島県内のワカメ養殖業の状況 (1996年)

項目	全国	徳島県	全国比
海面漁業・養殖業 (経営体)	163,169	2,674	1.6%
海面漁業・養殖業 (人)	301,420	4,330	1.4%
海面養殖業 (生産量:t)	1,314,551	23,873	1.8%
海面養殖業 (生産額:百万円)	573,936	8,797	1.5%
ワカメ養殖業 (生産量:t)	99,571	12,698	12.8%
ワカメ養殖業 (生産額:百万円)	16,527	2,159	13.1%
ワカメ養殖業 (経営体)	9,066	505	5.6%

2000年 月 日受付、2000年 月 日受理

* 徳島大学大学院工学研究科、〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町2-1

** 徳島大学総合科学部、〒770-8502 徳島県徳島市南常三島町1-1

2. ワカメ生産量の変遷と主要産地

ワカメ養殖は1965年頃から開始され、現在では年間およそ10万トが国内で生産されている。天然ワカメの生産量は1965年当時、5.6万トであったが年々減少し、1998年には3000トを下回り、現在ではほとんどが養殖産である^{1,2)}。国内のワカメ消費量は約20万トであり、不足分は韓国、中国などからの輸入で補っている。また、ワカメ養殖は全国各地で展開されているが、岩手、宮城、徳島が三大生産地であり、3県での生産量は全体の80%以上を占める。これら3県における生産量順位は過去10年間では不動であり、やや減少傾向であるが定常的な生産性を示している³⁾。

3. ワカメ加工業における物質フロー解析と未利用物の生分解システム

3.1 ワカメ加工業における物質フロー解析

ワカメは葉、茎、孢子葉（芽株）、根の各部位から成り、全長約2m程に成長した成葉体が収穫される。食用として用いられるのは主に葉部であり、生（湯

通しのみ）、塩蔵、乾燥、カット乾燥などされて出荷される。茎部はごく一部分を佃煮などの加工品として出荷されるが、芽株、根へ隣接する比較的太い部位は未利用である。芽株は全体の数%が生で出荷されるが、多くは未利用か、さらに成長させて次世代の孢子源として用いられる。根部には小生物や夾雑物が多く含まれ、全く利用されていない。ワカメ塩蔵加工法を例に挙げ、未利用物発生状況及びワカメ部位ごとの全リン量(T-P)、全窒素量(T-N)、全有機炭素量(TOC)について測定を行い、物質収支フローチャートとしたものを図1に示す。未利用物は主にワカメ採取後の部位選別時に発生する。芽株、茎、根についてはそのほとんどが利用されず、全体での未利用物発生量を推測すると、国内で年間約20万ト以上が発生していると試算される。図1の物質収支フローより、未利用物は炭素源だけでなく、リンや窒素源を適度に含むが、塩蔵工程をほとんど経ないため、過剰の塩分は含まれていない。よって、ワカメ未利用物は生物分解条件に対して適度な栄養素を有し、分解可能であると見なされる。また、水揚げ直後のワカメ未利用物の大部分は水分で占められており、固形分としては数%の含有率である。

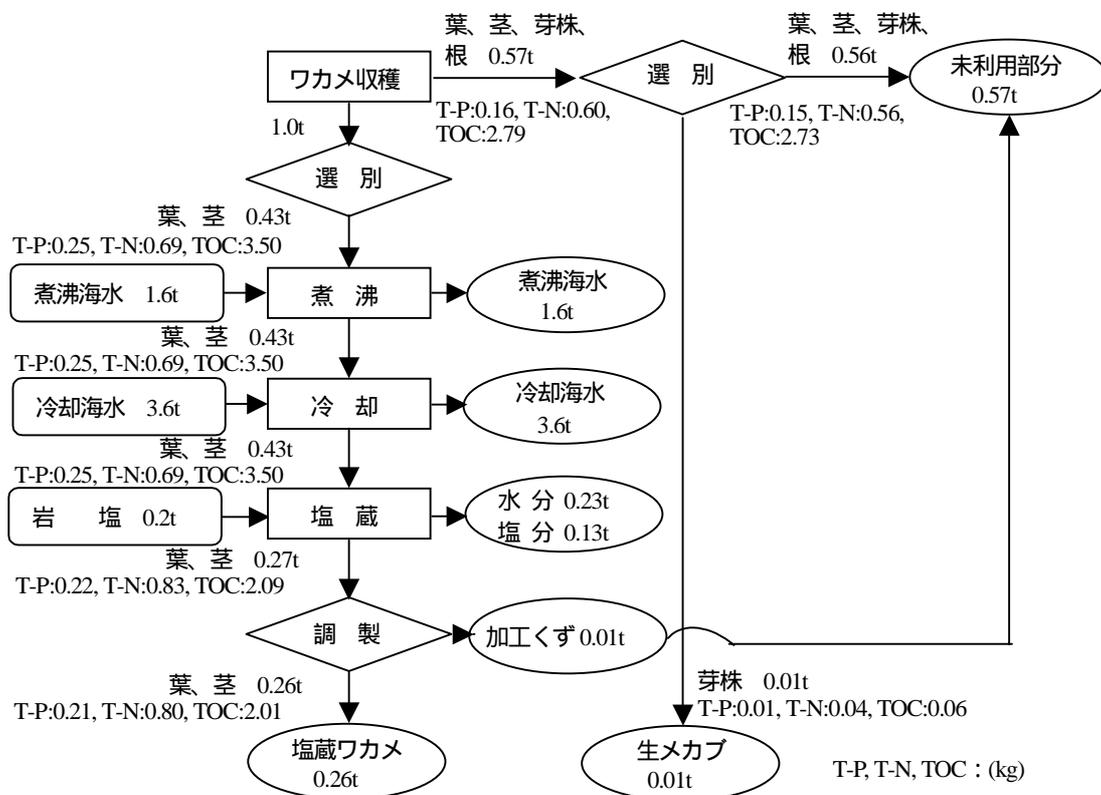


図1 ワカメ養殖・加工業における物質収支フローチャート

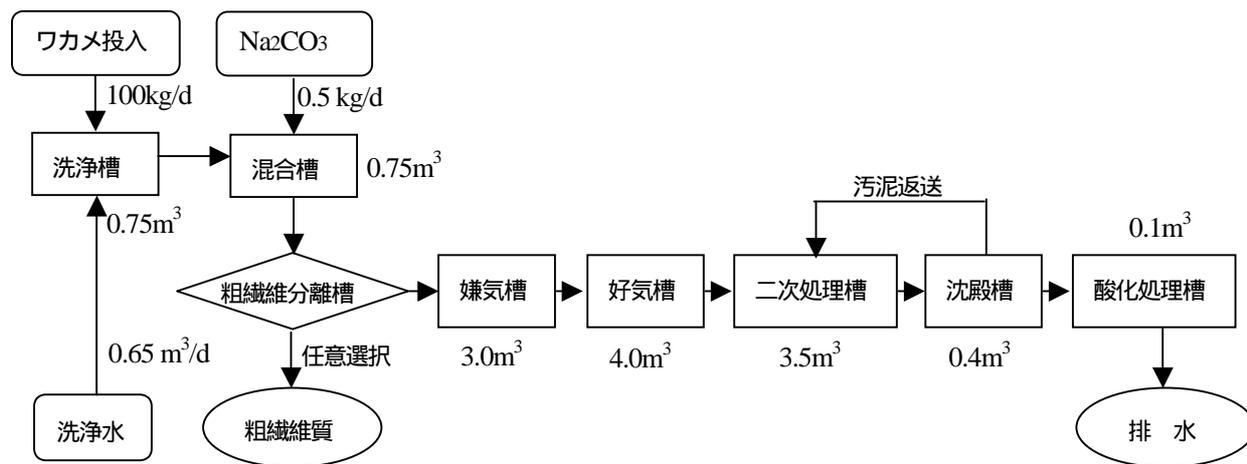


図 2 ワカメ未利用物の生物分解システム

3.2 ワカメ未利用物の生分解処理による分解システム

ワカメ未利用物の低環境負荷型処理技術として、微生物利用の分解システムを構築した。パイロットプラントは総容量 13.9m³、滞留時間は約 2 週間であり、その全処理工程を図 2 に示す。洗浄後のワカメは炭酸ナトリウム添加により、溶解部と粗繊維質とに分離される。粗繊維質の回収は任意であるが、溶解することにより生のままでは困難であった粉砕が容易になるため、炭酸ナトリウム添加はワカメ投入ごとに行われた。炭酸ナトリウム添加濃度は投入するワカメに対し、0.5%(w/w)程度とする。溶解・粉砕された投入物は嫌気、好気、二次処理槽へと送られ、凝集沈殿及び酸化処理後排出される。日投入量 100kg で行った際の処理状況では、投入時に COD:1200ppm、BOD:900ppm、TOC:900ppm、T-N:120ppm、T-P:30ppm 程度を示す。投入時高濃度であった各指標値が、凝集沈殿処理前では COD を除いて排水基準値以下となる。また、COD は凝集沈殿により排水基準値を下回り、さらに、次亜塩素酸処理を施すことで 10ppm 程度まで低減でき、本システムが分解システムとして利用可能と判断した。

4. 実験方法

4.1 炭酸ナトリウム溶解法によるワカメ未利用物の溶解成分と粗繊維質の分離方法

ワカメ表皮主成分のアルギン酸は、海水中では不

水溶性のカルシウム塩として存在するが、過剰の炭酸ナトリウムを添加することで、水溶性のアルギン酸ナトリウムとなり、工業的なアルギン酸塩の回収法として用いられている⁴⁾。特に、芽株、茎、根の部分は、中心部に粗繊維質を含むため、炭酸ナトリウムの添加により、可溶性の表皮形成部・内部構造体等と不溶性の粗繊維質とに分離することが可能となった。

4.2 熱水抽出法によるワカメ未利用物からの免疫賦活物質の分離方法

熱水を用いた抽出により、水溶性多糖類である免疫賦活物質の分離を行う。ワカメ未利用物は芽株、茎部、根部に分割し、温風乾燥器により水分率 10% 以下まで乾燥させ粉砕する。粉砕物へ水を添加し、100 で 2 時間の抽出後、抽出残渣を濾過して上澄を免疫賦活物質とする。免疫賦活物質分離およびウイルス感染クルマエビへの投与試験の一部については、水産大学の協力を得た⁵⁾。

4.3 熱水抽出物中の免疫賦活物質の分析方法

ワカメ未利用物の熱水抽出により得られる免疫賦活物質として、水溶性多糖である -1,3-グルカンに着目し分析を行う。分析サンプルとしては、ワカメ芽株、茎部、根部に分割した各乾燥粉砕物からの熱水抽出で得られた抽出物を用いる。旧来の分析には多段の操作が必用であったため、実用化に有効で簡易な酵素利用分析法を適用する。ここでは、酵素反応により生じる -1,3-グルカンの酵素反応生成物

をジアゾ化し、545nmにて吸光測定を行う。本反応は基質特異性が高いが、空気、水中に存在する真菌類の細胞壁成分の汚染を受けやすく、使用ガラス器具は全て250℃で乾熱滅菌し、希釈には滅菌蒸留水を用い、滅菌チップを用いるなどの汚染対策を施して測定を行う。

4.4 免疫賦活物質によるウイルス感染クルマエビに対する免疫賦活効果の評価方法

芽株、茎、根の各ワカメ未利用物から熱水抽出により得た免疫賦活物質について、温風乾燥後粉末化させた後、餌と混合してペレット状に成形する。パキキュロウイルス感染クルマエビ（15尾、4群）に対してペレット状餌の経口投与を行い、20日後の死滅率を比較する。免疫賦活物質無投与区画を設定し、対照として比較する。また、ワカメ各部位の熱水抽出物中に含まれる-1,3-グルカン分析結果をもとに、各投与物中免疫賦活物質含有率とウイルス感染クルマエビの死滅率との関係を検証する。

5. 結果及び考察

5.1 炭酸ナトリウム溶解法によるワカメ未利用物の溶解成分と粗繊維質の分離

炭酸ナトリウム溶解法においては、過剰の塩化ナトリウムの存在により溶解が阻害されるため、塩蔵加工品については流水による脱塩が必用であった。また、20℃以下では反応が極端に遅延するため加温が必用である。湯浴（80℃）中にて炭酸ナトリウム0.1%(w/w)以上の添加により溶解が進行し、1.0%(w/w)では約10分で溶解が完了した。溶解時のpHは11程度であり、生物分解可能な範囲であった。溶解状況には部位差が生じ、葉部は全て溶解し、茎部では溶解部と粗繊維質はほぼ同量得られた。芽株は8割程度溶解し、根部は1割程度溶解した。溶解部分の多糖類成分はアルギン酸を主とし、可溶性フコイダン、-1,3-グルカン(ラミナラン)である⁷⁾。粗繊維質についてはJIS変法⁸⁻¹⁰⁾を用い全セルロースについて分析した結果、乾燥粗繊維質中の70%(w/w)を占めることが確認された。ワカメ未利用物から得られた溶解部分及び、粗繊維質中の各成分については表2に示す。粗繊維質中セルロースについては、得られた粗繊維質を乾燥粉末化し、緩衝液中にてセルラーゼ反応を行うことで、オリゴ糖(セロピオース)生産が確認された。この反応において、反応基

質(粗繊維質)に対し、約8%の含有率でセロピオースを生産でき、約20%の含有率でグルコースを生産することが可能となった¹¹⁾。

表2 炭酸ナトリウム溶解法での分離画分中の多糖類

画分	多糖	画分中 含有率(%)
可溶部	粗アルギン酸	39.7
	粗フコイダン	24.9
	-1,3-グルカン	0.47
不溶部	全セルロース	69.8

5.2 熱水抽出法によるワカメ未利用物からの免疫賦活物質の分離

乾燥したワカメ未利用物からの熱水抽出により、上澄と繊維質を中心とする残渣が得られた。免疫賦活物質は水溶性であるため上澄中に存在する。濾過後の上澄を乾燥させ秤量し、抽出前の乾燥未利用物の重量比で約10%の免疫賦活物質が得られた。粉末化した免疫賦活物質はウイルス感染による死滅率検証に用いるため、クルマエビ用餌と混合してペレット状に形成された。

5.3 熱水抽出物中の免疫賦活物質の分析

乾燥ワカメ未利用物の各部位から得た、熱水抽出物中の免疫賦活物質(-1,3-グルカン)について分析を行った。得られた結果を表3に示す。芽株、茎、根の各抽出物より-1,3-グルカンが検出されたが、芽株からの抽出物に最も多くの-1,3-グルカンが含まれ、茎、根と比較して8倍程度の含有量が確認された。

表3 ワカメ熱水抽出物中 -1,3-グルカン

部位	-1,3-グルカン(mg/g)
芽株	4.7
茎	0.5
根	0.7

5.4 免疫賦活物質によるウイルス感染クルマエビに対する免疫賦活効果

免疫賦活物質混合餌の経口投与による、パキキュロウイルス感染クルマエビへの免疫賦活効果を検証した。投与した餌に含まれる各抽出物中 -1,3-グルカ

ン含有率と 20 日後の死滅率との関係を図 3 に示す。対照として設けた免疫賦活物質無投与区画では、100%死滅したのに対し、各部位の免疫賦活物質投与区画では死滅率が減少した。死滅率は -1,3-グルカン含有率に依存し、最も高い含有率である芽株抽出物投与区画では 90%が生存し、バキュロウイルスに対する有効な免疫賦活効果が示された。

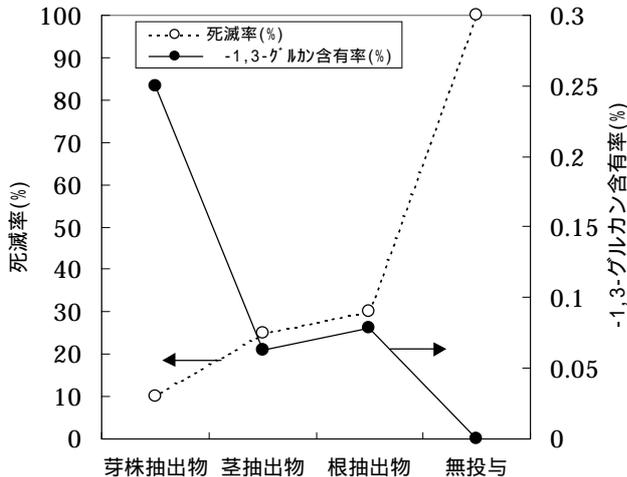


図 3 ウイルス感染クルマエビへのワカメ熱水抽出物投与による死滅率と -1,3-グルカン含有率の関係

5.5 地域内ゼロエミッション化のネットワーク構築の試み

地域内ゼロエミッション化として、徳島地域内のワカメ養殖加工漁協をモデルとし、他産業とのネットワーク構築を試みた。資源化対象として、主にワカメ茎、芽株部分を中心とした未利用物を適用し、熱水抽出法により得られる免疫賦活物質を有価物とした。徳島県は 1998 年当時で全国第 3 位のワカメ生産県であり、全国の養殖ワカメ生産量約 7.1 万トのうち 1.0 万トで、約 14 %の生産量を占めている。図 1 に示す物質収支フローチャートと現地調査から、徳島県におけるワカメ未利用物は年間約 2.5 万ト発生していると推測され、ロンドン条約施行前の 1980 年当時はその大部分が海洋投棄により処分されていたものと思われる。徳島県内における養殖ワカメ生産は約 10 の漁業協同組合（漁協）単位で統括されているが、ここではモデルとして、ワカメ年間生産量約 1500 ト、徳島県下最大規模の北灘漁協を対象として検討した。その結果、ワカメ加工工程の選別時に発生する、未利用物（乾燥重量で年産 41 ト）の熱水抽出による免疫賦活物質のクルマエビ養殖用餌添加剤として、地場企業数社を交えたゼロエミッションネットワーク構築の可能性が示唆された（図 4）。しかし、表 1 に示すように徳島県内にはワカメ養殖業者が密

集するが、他の海面養殖業の数は全国比で下位に位置している。前述のモデル例を徳島県内に適用すると、徳島県全体で年間約 32 トの免疫賦活物質が生産されるが、徳島地域内のみでの免疫賦活物質利用ネットワークでは約 1/8 しか消費できない。ワカメ養殖業は東北地域、徳島地域でそのほとんどを生産しており、未利用物発生状況も同様である。しかし、免疫賦活物質を利用する可能性のある養殖業者は全国に点在している。したがって、実際の利用の際には廃棄物処理関連法の規制や、地域外（徳島県外）への移送による輸送コスト等の面で困難な問題が多い。未利用物の地域外移送を進めるには法規制が障害となる。

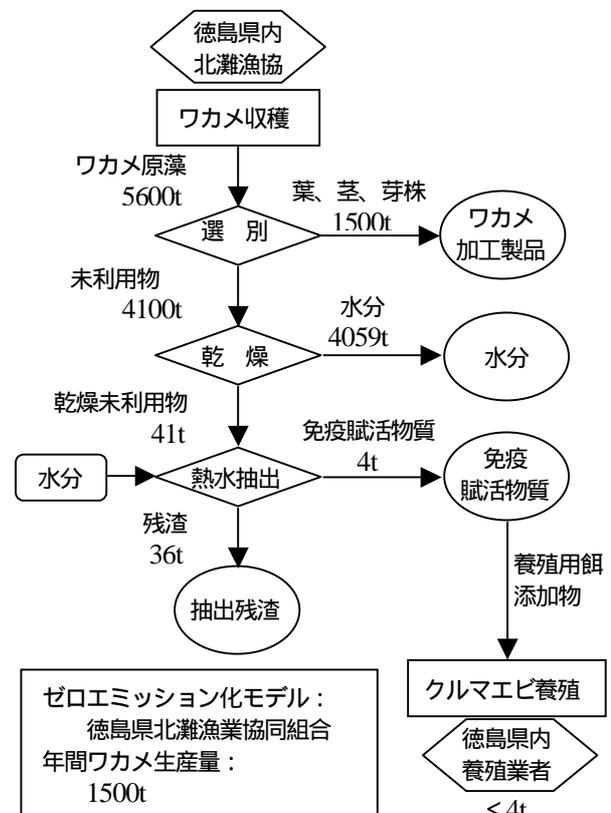


図 4 徳島県地域内ゼロエミッション化ネットワーク

5.6 地域外持ち出しを含むゼロエミッションネットワーク構築の展望

ワカメ未利用物から熱水抽出で得られる免疫賦活物質は、クルマエビのみならず、ブリ、ヒラメ、ニジマス、ウナギなどの養殖漁業においても高い免疫賦活効果を示している⁵⁾。一般的に養殖漁業においてはウイルス感染による死滅を防ぐため、通常、養殖餌には抗生物質を多量に添加しているが、この種の免疫賦活物質は抗生物質の代用品としての機能を十

分有する。しかし、養殖漁業は全国各地で展開されており、徳島地域内のみでのワカメ未利用物からの免疫賦活物質生産量だけでは、全国的な要求量に応えることは困難である。一方、ワカメ未利用資源が豊富に存在する東北地域でも、地域内のみでは免疫賦活物質を消費しきれず、芽株、茎部、根部から構成されているワカメ未利用物の全国的な集中管理が必要となる。国内のワカメ生産は約40%を岩手県が、約30%を宮城県が占め、中国四国地域を合わせると全体の約90%を占める。東北、中国四国地域でのワカメ未利用物の生産管理を行いながら、熱水抽出法の適用により、免疫賦活物質を抗生物質代用品として実用化できる可能性が、本研究により示唆された。しかしながら、熱水抽出後に凍結乾燥して得られた物質は有価物として輸送制限を受けないが、産業廃棄物については廃棄物処理法によって地域外への輸送が厳しく制限されているため、無価値であるワカメ未利用物自体の生産管理及び輸送システムについては地域外ネットワークを構築することが困難との判断に至った。したがって、地域外へのワカメ未利用物の輸送を容易にするゼロエミッションネットワークを構築可能にするためには、ゼロエミッション化目的に限定した未利用資源の他産業有効利用を可能にする輸送管理システムが必要である。すなわち、ワカメ養殖の主要産地である東北地域及び中国四国地域間で相互移動を容易にするような特例的な政策対応が求められる。

謝辞

本研究の一部は、文部省科学研究費補助金特定領域研究(A)により行われた。また、本研究の一部は、東京大学大学院農学生命科学研究科山崎素直教授、同大久保明助教授、工業技術院四国工業技術研究所廣

津孝弘室長、水産大学校高橋幸則教授の協力を得て行われた。ここに記して謝意を表す。

文 献

- 1) 大石圭一(編)(1994)海藻の科学, 朝倉書店, 59-70.
- 2) 中国四国農政局徳島統計情報事務所(編)(1988-1998) 農林水産省統計.
- 3) 徳島県水産課(編)(1998) 平成9年度水産業の動向と施策, 65pp.
- 4) 西出英一(1961) アルギン酸とその工業. 農産加工技術研究会誌, 8(3), 149-157.
- 5) 高橋幸則、伊丹利明、近藤昌和(1998) 魚類およびエビ類に対する免疫賦活物質の作用. 月刊海洋, 14, 154-158.
- 6) J. Aketagawa, H. Tamura and S. Tanaka (1995) Chromogenic Assay for (1-3)- β -D-glucans Using Limulus Coagulation Factor G, *J. Antibact. Antifung. Agents*, 23(7), 413-419.
- 7) 徳島県立工業技術センター(編)(1991) ワカメを原料とした高品質食品素材の開発. ふるさと認証食品普及促進技術開発事業成果報告書, 35pp.
- 8) 日本工業規格協会(編)(1994) 紙の繊維組成試験方法. JIS P 8120, 226-228.
- 9) 臼田誠人(他共著)(1991) パルプおよび紙. 文永堂出版, 39-43.
- 10) 祖父江寛、右田伸彦(編)(1958) 化学・工業セルロースハンドブック. 朝倉書店, 573-575.
- 11) T. Korenaga and S. Fujii (2000) Separation and enzymatic saccharification of cellulose from Wakame (*Undaria pinnatifida*). *Journal of Food Composition and Analysis*, 13(5), 865-871.

Analysis of Material Flow and Design of Zero-emission Technology in Production Process of Wakame (*Undaria pinnatifida*)

Shin-ichiro FUJII* and Takashi KORENAGA**

(*Graduate School of Engineering, University of Tokushima, Minami-josanjima
2-1, Tokushima 770-8506, Japan,

**Faculty of Integrated Arts and Sciences, University of Tokushima, Minami
josanjima 1-1, Tokushima 770-8502, Japan)

Abstract

The materials flow in the production process of the Wakame seaweed cultivation was analyzed. Unused materials, which were decomposed with microorganisms, are wasted more than 200000 ton/year in Japan, and the pilot decomposing system was proposed. Some usable materials found in the unused parts of Wakame were prepared by two extraction methods. Crude fiber unit, which included about 70% of total cellulose, was obtained by dissolving method with Na₂CO₃. Then immunopotentiative material was recovered by hot water extraction method, and -1,3-glucan was analyzed by a simple analytical method. This material is effective to cultivate the prawns and other fishes. The zero emission networks in Tokushima area was planed based on the immunopotentiative material for prawn cultivation. The network was also expanded to all of Wakame cultivation area in Japan, and a new policy for creating zero emission networks was suggested.

Key Words: wakame seaweed, unused materials flow, biodegradation,
immunopotentiative material, zeroemission